THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ

PAR

MOHADJER Kioumars

PREMIÈRE THÈSE

Etude minéralogique et géochimique de la série sédimentaire oligocène de Saint-Agoulin

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté :

Dosage des silicates par spectrographie de rayons X

Soutenues le 31 mai 1967 devant la commission d'examen

M.M. WYART — *Président*

HOCART, SABATIER, BRANCHE — *Examinateurs*

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ

PAR

MOHADJER Kioumars

PREMIÈRE THÈSE

Etude minéralogique et géochimique de la série sédimentaire oligocène de Saint-Agoulin

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté :

Dosage des silicates par spectrographie de rayons X

Soutenues le 31 mai 1967 devant la commission d'examen

M.M. WYART — *Président*

HOCART, SABATIER, BRANCHE — *Examinateurs*

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

PROFESSEURS

Doyen

M. ZAMANSKY

Professeurs

MM.	GRASSE	T	Evolution des êtres organisés
	PREVOST	T	Chimie organique
	WYART	T	Minéralogie & cristallographie
	TEISSIER	T	Zoologie
	AUGER	T	Physique quantique & relativité
	MONNIER	T	Physiologie générale
	PIVETEAU	T	Paléontologie
	ROCARD	T	Physique E.N.S.
	CARTAN	T	Mathématiques E.N.S.
	LAFFITTE	T	Chimie générale
	N...	T	Géométrie supérieure
	COULOMB	T	Physique du globe
	CRETIEN	T	Chimie minérale
	BOCQUET	T	Zoologie
	KASTLER	T	Physique E.N.S.
	EPHRUSSI	T	Génétique
	GAUTHERET	T	Biologie végétale CPEM
	LUCAS R.	T	Recherches physiques
	THOMAS A.	T	Biologie
	MORAND	T	Physique enseignement
	SOLEILLET	T	Physique CPEM
	FORTIER	T	Mécanique expérimentale des fluides
	DRACH	T	Biologie maritime
	QUENEY	T	Météorologie & dynamique de l'atmosphère
	GALLIEN	T	Embryologie
Mlle	CAUCHOIS	T	Chimie Physique
MM.	THELLIER	T	Physique du Globe
	PONCIN	T	Mécanique générale
	DUBREIL	T	Arithmétique & Théorie des nombres
	GAGNIARD	T	Géophysique appliquée
	CHAMPETIER	T	Chimie macromoléculaire
	CUVILLIER	T	Micropaléontologie
	TRILLAT		Microscopie & diffraction électronique
	WIEMANN	T	Chimie organique & structurale
	VASSY	T	Physique de l'atmosphère
	DESTOUCHES	T	Théorie physique
	AMIEL	T	Chimie générale
	MATHIEU J.P.	T	Physique optique
	COUTEAUX	T	Cytologie
	CHOQUET	T	Théorie des fonctions & topologie
	FELDMANN	T	Biologie végétale marine
	JOST	T	Physiologie comparée
	FORTET	T	Calcul des probabilités & physique math.
	SCHWARTZ	T	Calcul différentiel & intégral
	CHOUARD	T	Physiologie végétale
	MALAVARD	T	Aviation (technique aéronautique)
	BRELOT	T	Analyse supérieure
	EICHHORN	T	Botanique
	BENARD	T	Chimie appliquée
	DUGUE	T	Statistique mathématique
	SOULAIRAC	T	Psychophysiologie
	ULRICH	T	Physiologie végétale appliquée
	KIRRMANN	T	Théories chimiques
	CHÂDEFAUD	T	Botanique
Mlle	LE BRETON	T	Physiologie de la nutrition
MM.	LELONG	T	Application de l'analyse à la géométrie
	DEVILLERS	T	Anatomie camparée
	EHRESMANN	T	Topologie algébrique
	FRANÇON	T	Physique SPCN
	GLANGEAUD	T	Géographie physique, géologie dynamique
	GODEMENT	T	Mathématiques MGP
	PISOT	T	Technique mathématiques de la physique
	ROCH	T	Géologie
	SCHATZMANN	T	Astrophysique
	TERMIER	T	Géologie générale
	ZAMANSKY	T	Mathématiques générales
	LENNUIER	T	Physique M.G.P.
	ROUTHIER	T	Géologie appliquée
Mme	TONNELAT	T	Physique théorique
MM.	DIXMIER	T	Mathématiques M.P.C.
	SOUCHAY	T	Chimie générale
	AIGRAIN	T	Electrotechnique
	BRUSSET	T	Chimie systématique
	LEVY	T	Physique théorique des hautes énergies
Mme	CHAIX	T	Chimie biologique
Mme	HUREL PY	T	Biologie végétale CPEM
MM.	PANNETIER	T	Chimie générale I
	NORMANT	T	Synthèse organique
	YVON	T	Théories physiques
	COTTE	T	Physique électricité
	DUBOIS J.E.	T	Chimie organique physique
	LAMOTTE	T	Zoologie E.N.S.
MM.	OLMER	T	Energétique générale
	GAUTHIER	T	Mécanique appliquée
	BARCHEWITZ	T	Chimie physique
	BROSSEL	T	Physique atomique
	BUSER	T	Physiologie comparée
	CAMUS	T	Physiologie végétale
	CURIEN	T	Minéralogie & cristallographie
	POSSOMPES	T	Zoologie
	PULLMANN	T	Chimie quantique
	TEILLAC	T	Physi. nucléaire & radioactivité
	VILLE	T	Econométrie
	FREYMANN	T	Recherches physiques
	ROLLET	T	Chimie minérale
Mlle	JOSIEN	T	Chimie SPCN
MM.	CHEVALLEY	T	Géométrie alg. & théo. des groupes
	GERMAIN	T	Mécan. Théo. des fluides
	LUCAS G.	T	Géologie
	ALLARD	T	Chimie physique
	BERTHELOT	T	Physique des particules fonda.
	BRICARD	T	Météorologie
Mme	ALBE-FESSARD	T	Psycho-physiologie
MM.	JULIA	T	Etude des molécules nat. com.
	MAGAT	T	Physico-chimie des rayonnements
	MONOD	T	Chimie du métabolisme
	BRUN	T	Mécanique des fluides I
Mme	DUBREIL	T	Mathématiques (Agrégation)
Mme	LELONG	T	Mathématiques II E.N.S.
MM.	BELLAIR	T	Géologie S.P.C.N.
	BOUISSIERES	T	Radiochimie
Mme	COUTURE	T	Thermodynamique & mécan.
MM.	FRANC		Biologie animale CPEM
	SCHNELL	T	Botanique tropicale
	STOLKOWSKI	T	Physiologie générale
	ACHER	T	Chimie biologique
	BAUDOIN	T	Biologie animale CPEM
	BEAUMONT		Biologie animale SPCN
	BLAMONT		Géophysique ionosphère
	BOUREAU	T	Botanique
	CURIE D.		Physique MGP
	DURAND DELGA	T	Géologie
	HELLER	T	Physiologie végétale
	TORTRAT	T	Calcul des probabilités
	CAILLEUX	T	Géologie SPCN
	MAGNAN	T	Physique électricité
	DAUDEL	T	Mécanique ondulatoire
Mme	CHOQUET	T	Mécanique analytique et
	BRUHAT		mécanique céleste
Mlle	VEIL	T	Physiologie générale
MM.	LWOFF	T	Microbiologie
	SIESTRUNCK	T	Mécan. Phys. et expérimentale
	CABANNES	T	Mécanique théorique
	CAIRE	T	Géo. phys. & géo. dynamique
	COMOLET	T	Mécanique des fluides
	DELLOUE	T	Physique de l'exosphère
	HOUILLON	T	Biologie animale
	OLIVIER	T	Anthropologie
	SAMUEL	T	Math. (ENS jeunes filles)
	DE POSSEL	T	Analyse numérique
	CHARLOT	T	Chimie analytique
	CHATELET	T	Chimie CPEM
	MATTLER	T	Physique SPCN
	AUBOUIN	T	Géologie
Mme	BENOIT-GEUTAL	T	Physi. nucléaire & radio-act.
MM.	BOUGIS		Bio. vég. marine Villefranche s/mer
	RIGAUDY	T	Chimie SPCN
	COLLONGUES	T	Chimie appliquée
	DUBERT		Biochimie
	NOZIERES	T	Physique fondamentale
	CADIOT		Chimie organique
	IVANOFF	T	Océanographie physique
	FRANÇOIS		Zoologie
	TALBOT		Génie chimique
Mme	NOUGAREDE		Botanique
MM.	BRUHAT	T	Mathématiques MPC
	FOURNET		Electricité générale
	DEHEUVELS	T	Math. propédeutique
	FURON	T	Géologie SPCN
Mme	GANS	T	Génétique
MM.	GENEVES		Biologie végétale CPEM
	HUPE	T	Pétrographie
	HOLLANDE	T	Biologie générale
	LIONS	T	Analyse numérique
	MAITTE	T	Chimie organique
MM.	NICOLAS	T	Géologie appliquée
	PANIGEL		Biologie générale
	RAVIER	T	Pétrographie
	MOREL F.	T	Physiologie comparée
	ROSEAU	T	Mécan. théorique des fluides
	ROUBINE	T	Electronique E.S.E.
	SILBER	T	Chimie CPEM
	UEBERSFELD	T	Electronique
	THIRY	T	Mécanique céleste
	ABELES	T	Physique SPCN
	AMAT	T	Thermodynamique
	BALKANSKI		Physique M.P.C.
	LE CORRE	T	Electricité
	NATAF	T	Physique nucléaire & radio-act.
	ECHALIER		Biologie animale CPEM
	BARRAUD	T	Physique CPEM
	DARS		Géo. structurale & appliquée
	CAMEFORT		Botanique (agrégation)
	VICHNIEWSKY	T	Mécan. industrielle
	SIGWALT		Chimie SPCN
	BLAQUIERE		Automatique
	BARUCH		Physique propédeutique
	ARNOUS	T	Physique théorique
	SLONINSKI		Génétique
	MALLIAVIN	T	Math. propédeutique
	GAUDEMAR		Chimie propédeutique
	BROUSSE	T	Mécanique théorique
	ROSCH	T	Astronomie
	GUY	T	Physique expérimentale
	LAZARD	T	Mathématiques MPC
	MOREL P.		Physique MPC
	ARSAC		Programmation
	LEFEBVRE	T	Chimie MPC
	BOK		Physique fondamentale
	CHAPEVILLE		Biochimie
	BENOIT		Physique CPEM
	RIOT		Chimie CPEM
	JAUZEIN		Géologie ENS
	PREVOST G.		Biologie cellulaire
	FAVARD P.		Biologie animale CPEM
Mme	CHARNIAUX-COTTON		Evol. des êtres organisés
Mlle	FICINI		Chimie CPEM
MM.	LEQUEUX		Astronomie
	COHEN TANNOUDJI		Physique atomique
	HERVE	T	Mathématiques
Mme	PECKER-WIMEL	T	Astrophysique
MM.	TAVERNIER		Physique PC
	DURAND M.		Biologie animale SPCN
	PASCAUD		Physiologie
Mme	PETIT		Biologie animale CPEM
MM.	CAGNAC		Electricité
	FALK-VAIRANT		Physique nucléaire
	KRASNER	T	Mathématiques
	BENZECRI	T	Statistiques
	VINH MAU		Physique M.G.P.
	DUQUESNES		Physique CPEM
	SCHUTZENBERGER	T	Programmation
	TREMILLON		Chimie MPC
	FAYARD		Chimie MPC
	BUVET		Chimie CPEM
	AUTHIER		Minér. et cristallographie
	BONNEFILLE		Electrotechnique
Mme	PUISEUX DAO		Biologie végétale
M.	BERGER	T	Géométrie supérieure
Mlle	LIBERMANN	T	Mathématiques
MM.	DEDONDER	T	Biologie cellulaire
	DUFOUR	T	Electronique I.U.T.
	SCHAAL		Chimie CPEM
	BAUCHOT		Anatomie comparée
	LANCE	BV	CPEM
	GIRAUD		Botanique E.N.S.
	HULIN		Physique PC
	VIGIER		Génétique
	GUERN		Biologie végétale
	SLODZIAN		Physique CPEM
	LACOMBE		Logique mathématique
	TAVLITZKI		Biologie cellulaire
	ARVIEU		Physique CPEM
	TAXI		B.A. CPEM
	COLLENOT		B.A. CPEM
	BASSELIER		Chimie propédeutique
	BADOUAL		Electronique I.U.T.

Le Secrétaire Général

R. POULLAIN

UNIV. LEIDEN BIBL.

A ma femme

A mes parents

A Monsieur WYART, Professeur

A Monsieur SABATIER, Directeur de Recherches

profonde reconnaissance

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546604_0087

Cette thèse a été réalisée au Service de MINERALOGIE, de la DIRECTION des PRODUCTIONS du COMMISSARIAT à l'ENERGIE ATOMIQUE, qui a bien voulu en autoriser la publication, et auquel j'adresse mes remerciements.

Ma profonde gratitude à Monsieur WYART, Professeur à la Sorbonne, Membre de l'Institut, qui a toujours suivi mon travail avec un vif intérêt et une extrême bienveillance.

Je remercie très vivement Monsieur SABATIER, Directeur de Recherches, pour m'avoir confié cette étude et m'avoir suivi au cours de ma tâche avec une inlassable attention.

Je remercie également Monsieur le Professeur HOCART pour l'honneur qu'il m'a fait de bien vouloir examiner cette thèse.

Mes remerciements s'adressent aussi à :

Monsieur LECOQ, de la Direction des Productions, qui m'a accordé un stage dans le Service de Minéralogie du C.E.A. et à son adjoint Monsieur GIRARD.

Monsieur BRANCHE, Chef du Service de Minéralogie, pour son accueil sympathique, et pour toutes les facilités qu'il m'a accordées dans son Service, pour cette étude.

Monsieur COTTINEAU et Monsieur SCEMAMA pour les documents nécessaires et utiles qu'ils m'ont donnés.

Monsieur RAOUL, Chef de la Mission Nord-Auvergne du C.E.A., qui m'a procuré une aide de valeur, pour les études sur le terrain et le choix des échantillons.

Monsieur de CAMBOURG qui a établi le log lithologique et stratigraphique.

Monsieur GUILLEMAUT, Chef du laboratoire des Rayons X, qui m'a particulièrement dirigé et aidé pas à pas dans son laboratoire, dont l'atmosphère sympathique et l'accueil aimable sont inoubliables.

Monsieur CHANTRET qui m'a toujours aidé et renseigné patiemment.

Mademoiselle ROPERT et Monsieur POUGET pour les analyses effectuées dans leurs laboratoires.

Messieurs BENARD et POUZOULET qui ont réalisé toutes les photographies.

Madame LIMET et Monsieur PALLIER qui se sont chargés avec gentillesse du travail de dactylographie et de mise en page.

Je veux également remercier le Service d'Accueil des Stagiaires étrangers du Gouvernement Français pour toutes les facilités qu'il m'a procurées, afin de continuer les études en France.

RÉSUMÉ

L'étude de la série oligocène de Saint-Agoulin commence par une vue générale du terrain.

Au point de vue minéralogique, nous avons fait le dosage du quartz, de la calcite, des argiles et des feldspaths et une étude granulométrique.

Par ces études, on a distingué deux familles lithologiques : l'une riche en quartz dans la partie inférieure, l'autre riche en carbonate dans la partie supérieure.

Dans la première, on a identifié du quartz et des feldspaths en abondance, différentes argiles et peu de calcite.

Les argiles de cette famille sont constituées de beaucoup d'illite, très peu de kaolinite et de montmorillonite en teneur faible et très variable.

Dans la famille carbonatée, on trouve beaucoup de calcite, des feldspaths potassiques et sodiques moins abondants et peu variables, des argiles et peu de quartz.

Dans les argiles de cette famille, l'illite et la kaolinite ont à peu près les mêmes comportements que dans la famille précédente. La montmorillonite a augmenté et ne montre pas de fluctuations sensibles.

On a dosé les éléments (Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na, K, Ti, Mn, P, Ba, Sr, Rb, Pb, Cu, Ni, Co, V, Be, B, Zr, U) par différentes méthodes d'analyse (analyse chimique, fluorescence X, spectrographie et fluorimétrie).

Une étude de corrélation entre les éléments chimiques et les constituants minéralogiques a été réalisée. Par cette étude, on a justifié quelques règles, et on a établi certains principes.

Puis, nous définissons les conditions de remplissage de cette dépression, sous l'effet général des conditions climatiques de la période oligocène sur les bassins du Massif-Central. Ainsi, on trouve quelques particularités correspondantes à la dépression étudiée.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
I - CADRE GEOLOGIQUE	13
II - ETUDE MINERALOGIQUE	17
1) Granulométrie	17
2) Morphologie des sables	17
3) Les dosages :	20
- Dosage de la calcite	20
- Dosage du quartz	20
- Dosage des argiles	20
- Dosage des feldspaths	22
4) Conditions opératoires	22
III - LES RESULTATS MINERALOGIQUES	25
1) Répartition des divers minéraux	25
2) Conditions de génèse	30
IV - ETUDE GEOCHIMIQUE	31
1) Dosage des éléments majeurs	31
2) Dosage des traces	32
3) Résultats :	32
- Les éléments majeurs	32
- Les éléments mineurs	33
V - RELATIONS ENTRE LES ABONDANCES DES ELEMENTS MAJEURS, MINEURS ET DES CONSTITUANTS MINERALOGIQUES	37
1) Principe	37
2) Résultats	37
3) Discussion	41
VI - CYCLE SEDIMENTAIRE	45
CONCLUSION	47

INTRODUCTION

Notre étude concerne la bordure ouest de la "Grande Limagne", dans une région située entre Chatel-Guyon au sud et Saint-Priest-d'Andelot au nord. Là, un alignement nord/nord-est est interprété par les géologues du C.E.A. comme un ancien dôme du socle qui sépare les grands fonds subsidents de l'est d'une zone où la subsidence était moins marquée et n'a donné lieu qu'à des dépôts d'épaisseur relativement modeste ; entre ce dôme, appelé la ride de Saint-Myon et la bordure actuelle nord-sud du socle, une autre série de paléostructures divise le bassin en plusieurs dépressions, qui sont du nord au sud :

- la dépression de Saint-Agoulin ;
- la dépression de Combronde ;
- la dépression de Teilhède.

Sur la figure 1, on voit cet ensemble de dépressions. La Figure 2 donne un aperçu du relief de cette région au moyen de courbes de niveaux.

Nous avons étudié la première dépression, au moyen des carottes du sondage C.E.A. LMG-S.5.

La dépression de Saint-Agoulin, dont la superficie est d'environ 10 kilomètres carrés, est remplie par des sédiments argilo-sableux du stampien supérieur et inférieur et de l'aquitanien.

Le stampien inférieur est sableux et le supérieur et l'aquitanien sont surtout calcaires.

Le socle est formé de granite hercynien et de roches volcano-sédimentaires viséennes.

Après une vue générale sur la géologie du bassin, nous exposerons les résultats obtenus sur la minéralogie et la géochimie des roches dont il est formé.

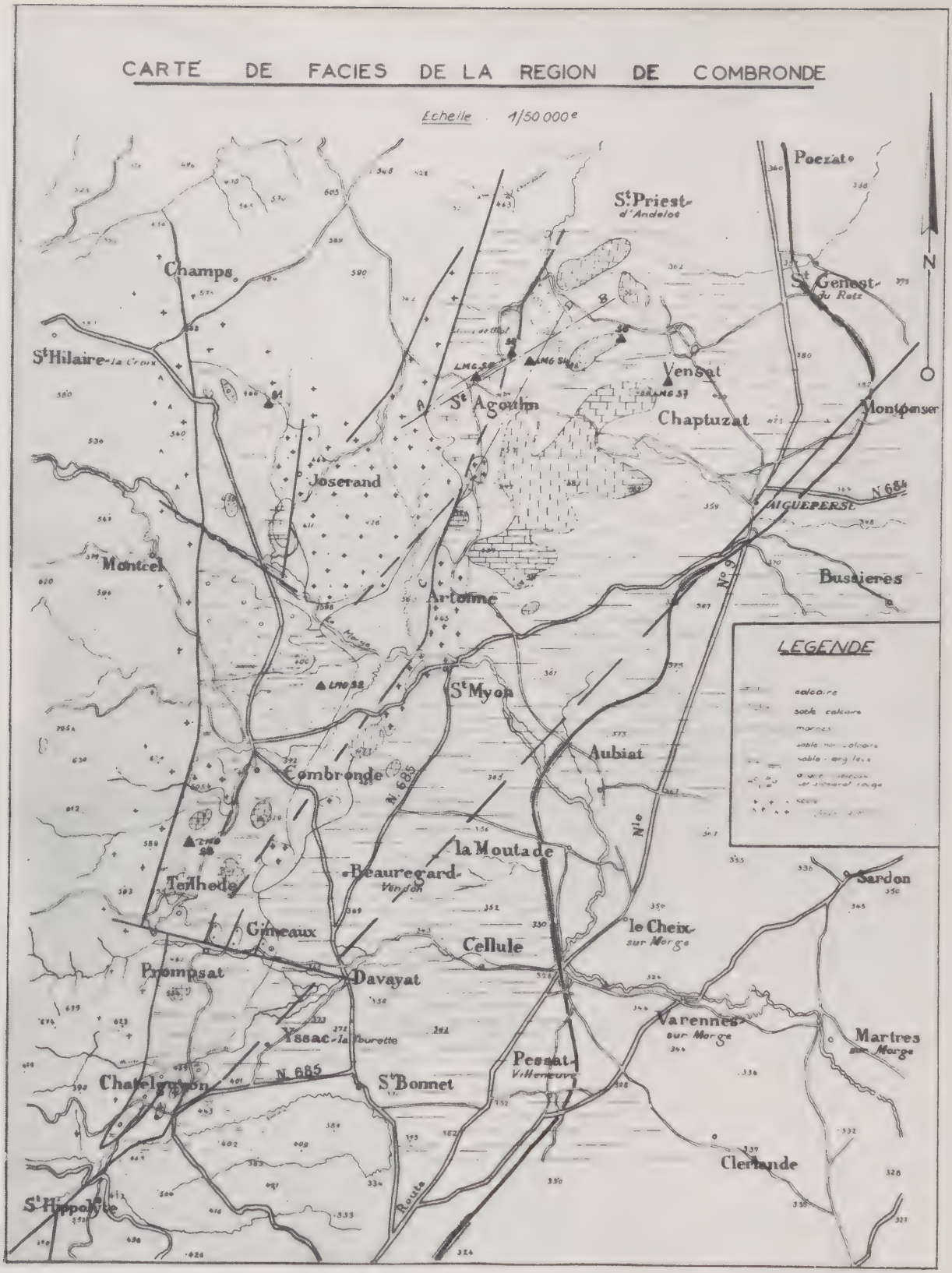
CARTE DE FACIES DE LA REGION DE COMBRONDE
Echelle 1/50 000e
N
St Priest d'Andelot
Poezat
St Genest du Retz
Champs
St Hilaire la Croix
St Agoulin
Venat
Chaptuzat
Montpenser
Joserand
N 684
AIGUEPERSE
Montcel
Busaieres
Artoine
LEGENDE
St Myon
Aubiat
Combronde
N 685
la Moutade
Beauregard Vendon
Teilhede
Gimeaux
Cellule
le Cheix sur Morge
Sardon
Prompsat
Davayat
Varennes sur Morge
Martres sur Morge
Ysaac la Burette
Pessat Villeneuve
Chateleyon
St Bonnet
Clerlande
St Hippolyte
Raule

Fig. 1

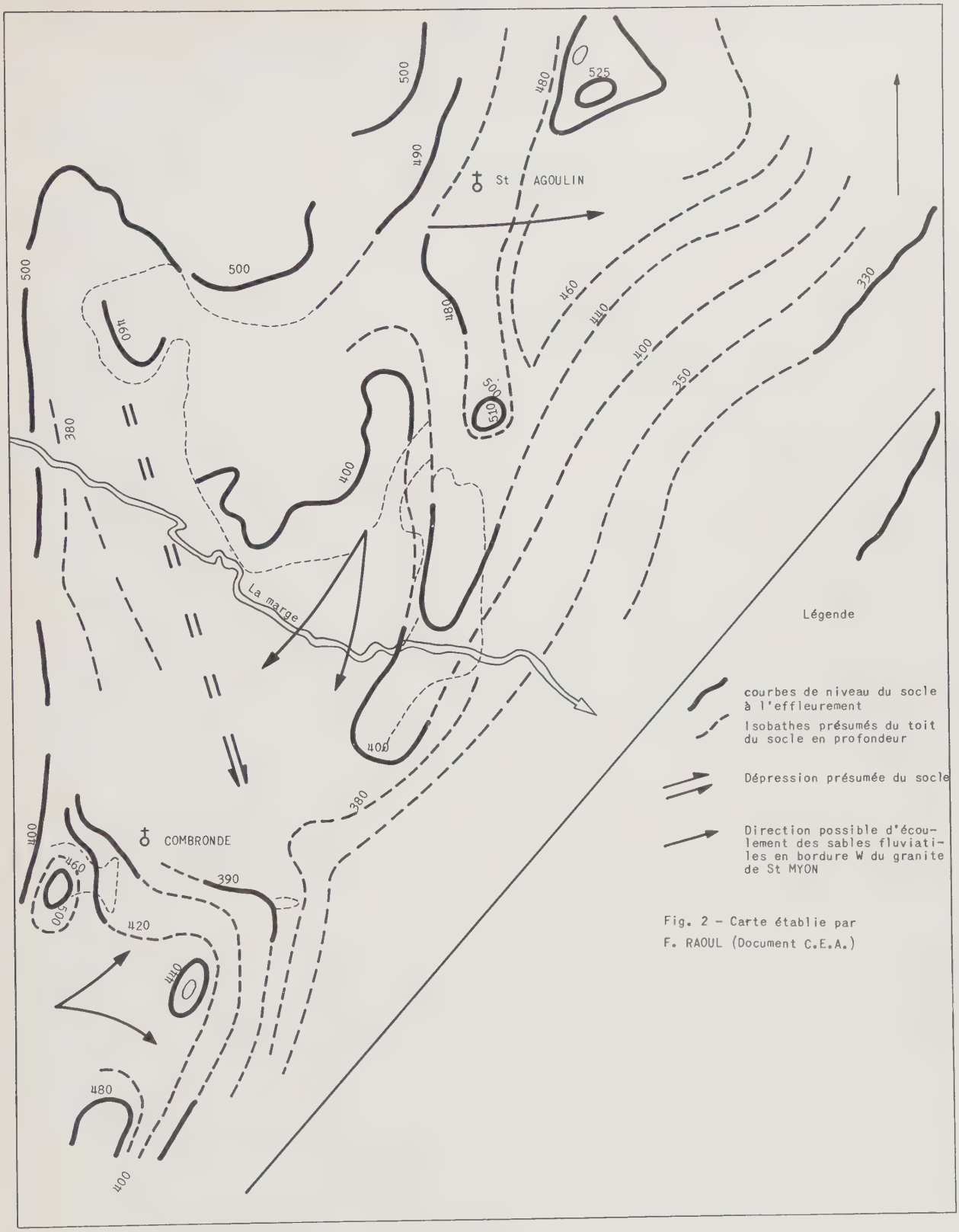

Fig. 2 – Carte établie par F. RAOUL (Document C.E.A.)

Fig. 2

I - CADRE GÉOLOGIQUE

1 - GENERALITES SUR LE SOCLE ET LES SEDIMENTS DE LA DEPRESSION :

A) Le socle :

Le socle est formé de tufs ryolithiques. L'âge de ces formations n'est pas déterminé exactement.

B) Les sédiments :

Les sédiments, qui reposent sur le socle, sont d'âge oligocène. La succession stratigraphique de ce bassin est de bas en haut la suivante :

- Stampien :
  - inférieur : détritique avec sables et argiles sableuses,
  - supérieur : à dominante calcaire.
- Aquitanien : en continuité avec le stampien supérieur et de même nature calcaire.

Sur la Figure 3, on voit deux coupes transversales du bassin Saint-Agoulin.

On ne s'attardera pas sur les différentiations stratigraphiques qui sont ici difficiles à établir, en raison du manque de fossiles caractéristiques.

2 - ASPECT GENERAL DU SONDAGE :

Sur le sondage effectué au centre de la dépression, qui atteint 110 mètres de profondeur et qui traverse toutes les couches jusqu'au socle, on a distingué de bas en haut (Figure 4) les parties suivantes :

A) Le socle :

Le socle est un tuf ryolithique à albite et biotite altérées ; certaines biotites sont chloritisées. Les quartz à tendance dihexaédrique sont souvent repris par des venues de quartz très fin et toute la roche parait être le siège d'une intense silicification ; à moins qu'il ne s'agisse d'une vieille ryolithe en voie d'altération. On note la présence de filonnets de calcite au voisinage ou à l'emplacement des plagioclases.

B) Les sédiments :

Dans les sédiments, on distingue tout d'abord deux familles bien individualisées : l'une contenant du quartz et des feldspaths en proportions très variables, que nous appelons "la série détritique sableuse" ; l'autre contenant surtout de la calcite, nommée "la série détritique carbonatée", par opposition à la précédente.

a) La série détritique sableuse :

On peut subdiviser cette série de bas en haut comme suit :

- Dépôts sableux fins :

Ces dépôts sont constitués par un peu d'argile et beaucoup de sables. Dans les sables, on distingue du quartz, des feldspaths, de la biotite altérée, très peu de tourmaline et des galets de granite. La couleur des sédiments est rose-brun. Les grains sont très anguleux. La puissance totale est de l'ordre d'une quinzaine de mètres.

Une couche de conglomérats, de même type que le socle, intervient dans cette formation (à 104 mètres). On distingue un gros fragment de quartz d'origine filonienne dans cette couche.

- Dépôts versicolores argilo-sableux inférieurs :

Ces dépôts sont séparés des précédents par une couche de conglomérats (à 92 mètres) quartzo-feldspathiques à orthose et plagioclases acides (feldspaths en voie de séricitation) à structure engrenée équigranulaire, qui contient quelques biotites très altérées et peu de muscovite.

Les dépôts eux-mêmes n'ont pas changé beaucoup. Les sables sont toujours dominants, mais l'importance des galets de granite et de la biotite diminue. On voit très peu de chlorite et de muscovite. Les grains sont un peu arrondis. La puissance est à peu près de 20 mètres.

- Dépôts versicolores argilo-sableux supérieurs :

Les constituants sont semblables à ceux des dépôts précédents. Les éléments de granite et de biotite sont très rares et la muscovite est plus abondante. Une couche de conglomérats est intercalée dans la formation (à 64 mètres). Les dépôts atteignent une puissance de 10 mètres.

Les trois formations que nous venons de décrire se caractérisent par la permanence de la biotite. Nous appelons l'ensemble de ces formations "série détritique micacée".

- Unité verdâtre argilo-sableuse.

Elle débute par un niveau de conglomérats, puis est surmontée par un niveau calcaire.

Dans la couche de conglomérats (à 62 mètres), les fragments sont très petits et on reconnaît dans ceux-ci des débris quartzeux, de beaux fragments feldspathiques (microcline) de l'ordre du centimètre. Parfois ces blocs sont emballés dans une argile verte.

Cette unité contient du quartz, des feldspaths et peu d'argile. La biotite est très peu abondante, tandis que la muscovite a tendance à augmenter. Les éléments granitiques sont en voie de disparition. L'unité a une puissance de 10 mètres.

b) La série détritique carbonatée :

Cette série se distingue des dépôts sous-jacents par les caractères suivants :

- La teinte des sables passe du brun au gris.

- Les grains sont nettement plus arrondis.

- Les carbonates, en proportion infime jusqu'ici, deviennent abondants, essentiellement sous forme de calcite. Des passées presque pures de calcite ne sont pas rares.

On distingue deux anomalies dans cette série où le quartz redevient dominant (à 10 mètres et à 18 mètres).

Comme autres minéraux, on trouve du quartz, des feldspaths altérés et des argiles ; pratiquement plus de galets de granite ni de biotite, un peu de muscovite, parfois de la tourmaline en quantité très faible. La puissance est de 53 mètres.

La série sableuse appartient peut-être uniquement au stampien, et la série carbonatée à la fin du stampien ou au début de l'aquitanien.

3 - ECHANTILLONNAGE :

Nous avons utilisé les carottes du sondage LMG-S.5 (Figure 4) qui traverse tout le sédimentaire et atteint le socle. Les prélèvements ont été faits avec le souci d'obtenir un échantillonnage assez serré des divers faciès.

L'intervalle maximum entre les échantillons successifs est de 10 mètres et l'intervalle minimum de l'ordre du mètre. Après l'examen macroscopique des échantillons tout-venants, on les a divisés en plusieurs fractions identiques pour les essais non-destructifs (granulométrie et analyse minéralogique) et les essais destructifs (analyse chimique, fluorescence X et spectrographie, ...).

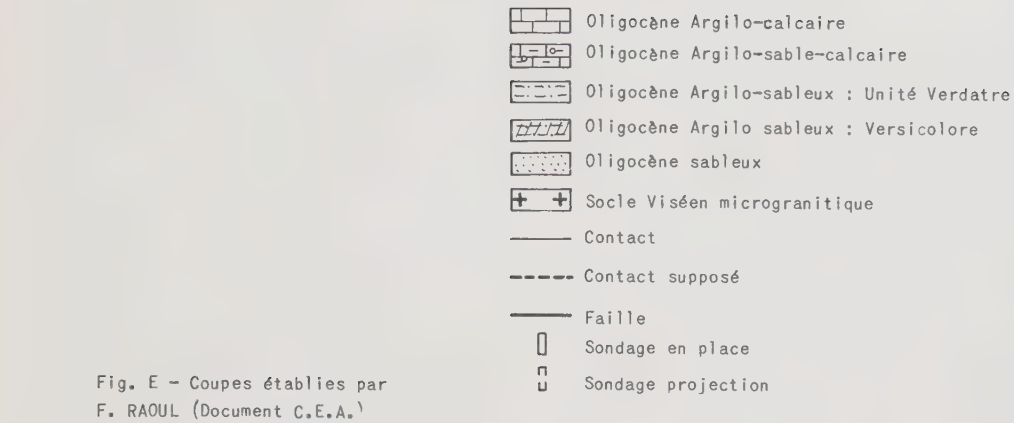

Fig. E - Coupes établies par F. RAOUL (Document C.E.A.)

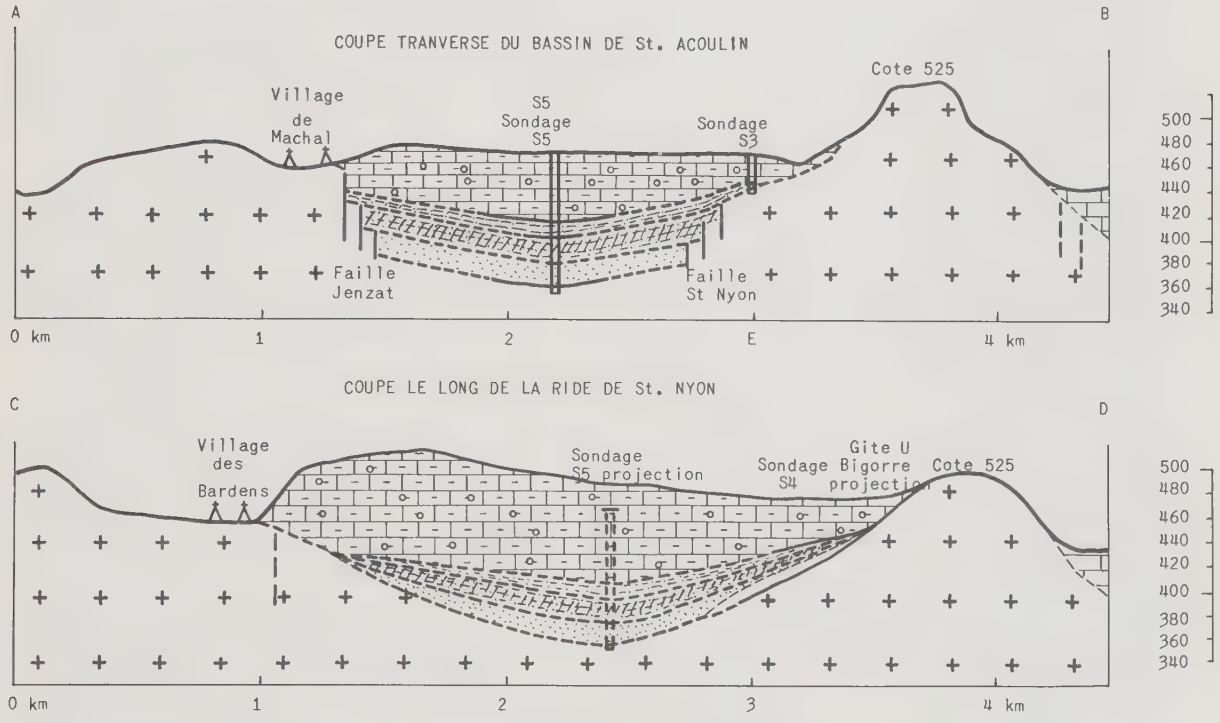

Fig. 3

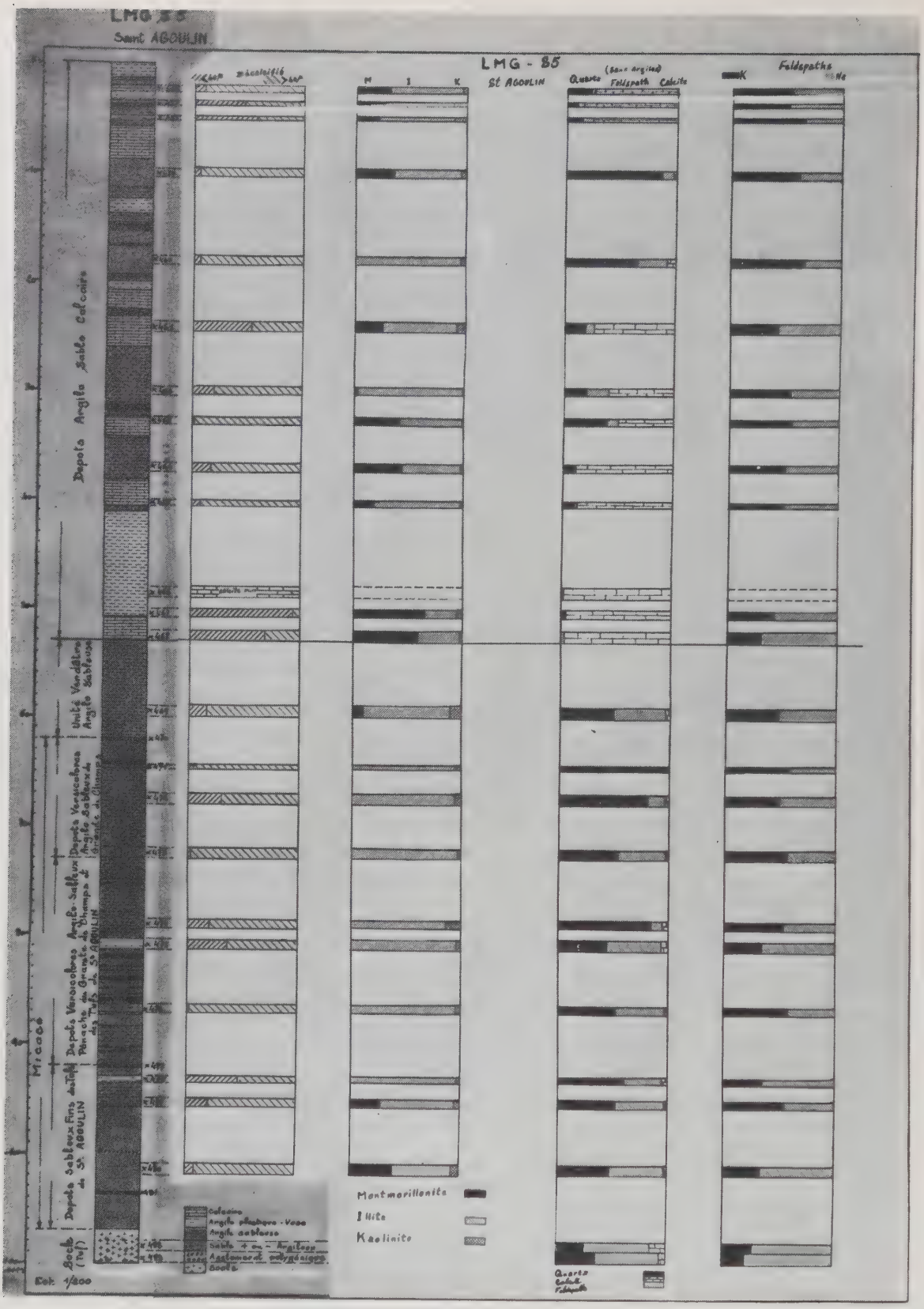
LMG 85
Saint AGOULIN
LMG - 85
St AGOULIN
Quartz
Feldspath
Calcite
Feldspaths
Depots Argile Sable Calcaire
Unité Verdâtre Argile Sableuse
Depots Versicolores Argile Sableuse
Depots Versicolores Argile-Sableux
Micacé
Montmorillonite
Illite
Kaolinite
Echelle 1/200

Fig. 4

II - ÉTUDE MINÉRALOGIQUE

Nous nous sommes proposés de faire la granulométrie et le dosage de la calcite, du quartz, des feldspaths et des argiles.

Dans ce chapitre, nous décrirons d'abord les méthodes d'analyse. Les résultats numériques seront exposés plus loin.

1 - GRANULOMETRIE :

Après la décarbonatation, avec HC1 dilué, d'une partie d'échantillon tout-venant, nous avons séparé la partie inférieure à 40 microns par tamisage sous l'eau. Cette séparation en fraction supérieure à 40 microns et fraction inférieure à 40 microns nous donne une approximation du rapport sable/argile (Tableau 1).

Les deux fractions sont séchées à l'air et on a calculé leur rapport. Ensuite, on a passé la fraction supérieure à 40 microns dans une série de tamis à mailles variées (4mm, 2 mm, 1 mm, 500μ, 250μ, 125μ, 80μ et 40μ). On a pesé chaque fraction et on a ramené le total à 100 pour en déduire la granulométrie des sables.

D'après les courbes de granulométrie cumulatives (Figure 5), nous avons calculé l'indice de classement qui se présente sur le Tableau 2. L'indice de classement est défini par $S = \sqrt{Q_{75}/Q_{25}}$

S est l'indice de classement.

Q_{75} est le quartile à 75 %.

Q_{25} est le quartile à 25 %.

Certains auteurs (V.GABIS) prennent les centiles suivants : 16 % et 84 %.

Ici, les courbes cumulatives sont effectuées en fonction croissante de la taille des grains. Le classement est d'autant meilleur que cet indice s'approche de l'unité.

On voit que d'une façon générale les niveaux les mieux classés se trouvent au sommet. Plus on s'approche du socle, plus le classement est mauvais ; ce qui correspond bien au rythme normal de sédimentation : d'abord il y a apport des éléments les plus grossiers, puis les particules fines se déposent à la fin. Mais on doit noter que dans la partie sableuse, il y eu des alternances de sédimentation d'éléments grossiers et fins, mises en évidence par la variation hétérogène du coefficient de classement ; cela correspond à différentes conditions de transport.

2 - MORPHOLOGIE DES SABLES :

Sur la fraction des sables, entre 500 μ et 1 mm, on a fait une étude de morphoscopie à l'aide d'une binoculaire. Nous avons observé qu'il y a un passage progressif de grains anguleux, à la base de la série, à des grains arrondis, au sommet. Cela implique un transport beaucoup plus long pour les sables de la série carbonatée.

TABLEAU 1

SAINT - AGOULIN (LMG-S.5)

Proportions des sables et des argiles (après déclacification)

	Référence	Profondeur mètres	Inférieur à 40 μ (argiles)	Supérieur à 40 μ (quartz + feldspaths)
Série Carbonatée	NAV 456	2	11,46	88,54
	NAV 457	4	49,2	50,8
	NAV 458	5	58,1	41,9
	NAV 459	10	9,1	90,9
	NAV 460	18	10	90
	NAV 461	24	54,7	45,3
	NAV 462	30	23,4	76,6
	NAV 463	33	53,6	46,4
	NAV 464	37	18,8	81,2
	NAV 465	40	10,5	89,5
	NAV 466	48	0	100
	NAV 467	50	96	4
	NAV 468	53	69,6	30,4
Série Sableuse	NAV 469	60	17,9	82,1
	NAV 471	65	5,1	94,9
	NAV 472	67	31,6	68,4
	NAV 473	73	1,2	98,8
	NAV 474	79	22	78
	NAV 475	81	37	63
	NAV 476	87	1,3	98,7
	NAV 478	93	47,3	52,7
	NAV 479	95	20,6	79,4
	NAV 480	101	8,9	91,1
Le Socle	NAV 482	108	0	100
	NAV 483	109	0	100

TABLEAU 2

SAINT - AGOULIN (LMG-S.5)

Indices de classement granulométrique

Référence	Profondeur mètres	Q (25 %) μ	Q (50 %) μ	Q (75 %) μ	$S = \sqrt{\frac{Q_{75}}{Q_{25}}}$
NAV 456	2	250	360	500	1,42
NAV 457	4	220	300	380	1,32
NAV 458	5	230	350	500	1,48
NAV 459	10	370	670	1.220	1,82
NAV 460	18	230	420	700	1,73
NAV 462	30	220	390	700	1,78
NAV 463	33	500	920	1.700	1,85
NAV 464	37	120	240	420	1,87
NAV 468	53	83	190	440	2,32
NAV 469	60	350	900	1.720	2,24
NAV 471	65	110	150	240	1,48
NAV 472	67	220	500	1.200	2,37
NAV 473	73	100	128	180	1,34
NAV 474	79	120	325	820	2,65
NAV 475	81	160	320	600	1,94
NAV 476	87	1.480	2.100	2.500	1,30
NAV 478	93	160	450	1.200	2,74
NAV 479	95	300	900	2.100	2,65
NAV 480	101	130	220	300	1,55

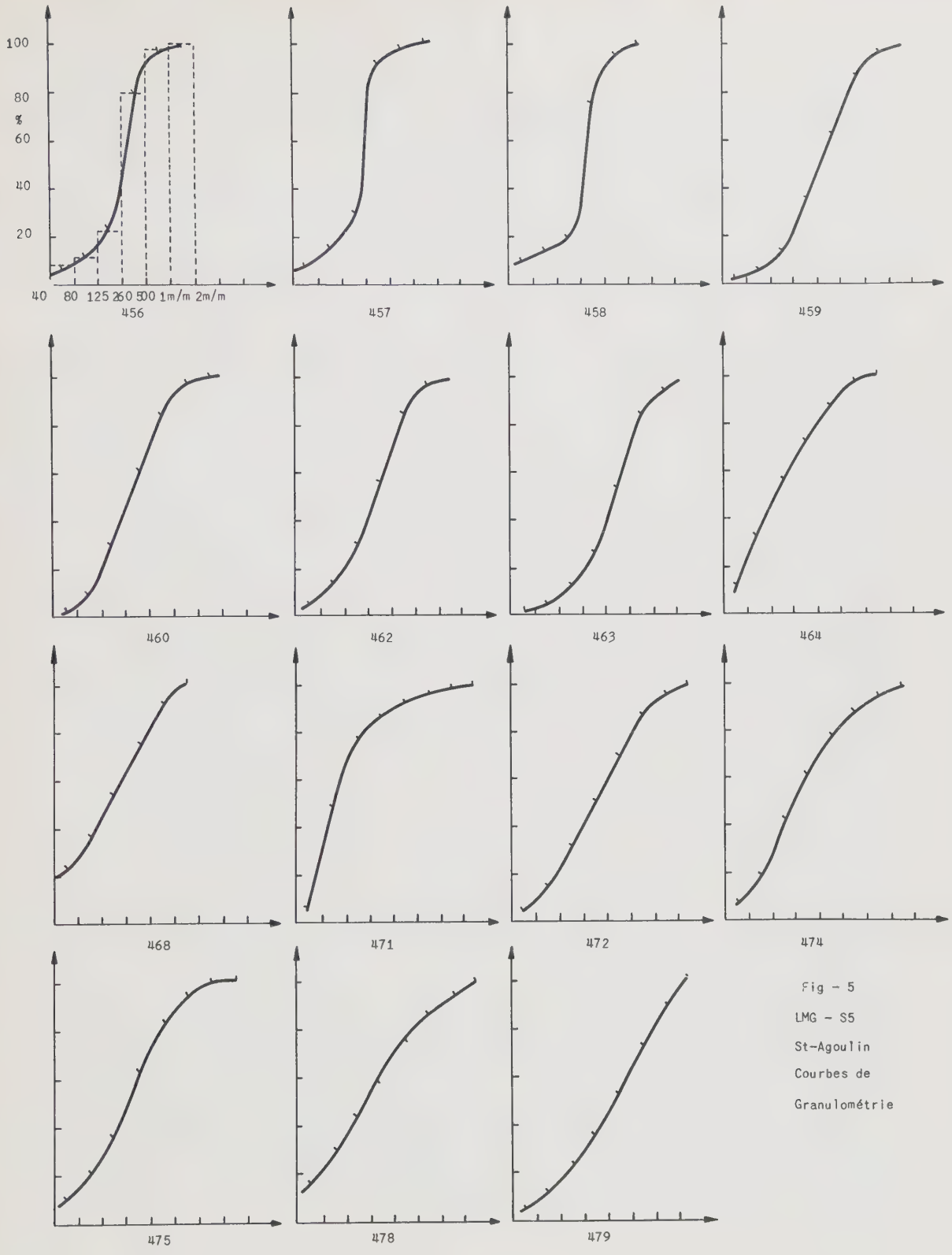

Fig - 5

LMG - S5

St-Agoulin

Courbes de

Granulométrie

Fig. 5

3 - LES DOSAGES :

A) Dosage de la calcite :

Pour le dosage de la calcite, qui sert en même temps d'étalon interne pour le dosage du quartz, nous avons utilisé un calcimètre. Dans cet appareil, la teneur en calcite se déduit du volume de CO_2 dégagé par traitement avec HCl.

$$CO_3Ca + 2HCl \longrightarrow CO_2\uparrow + H_2O + Cl_2Ca$$

On tient compte des facteurs de correction relatifs à la température et à la pression.

Nous avons effectué nos dosages de calcimétrie sur une partie, broyée finement, de l'échantillon global. La dolomie, qui perturbe les dosages, n'existe pas dans notre sondage.

B) Dosage du quartz :

Nous avons passé une partie des échantillons "tout-venant" broyés finement, ainsi que des étalons, en enregistrement diffractométrique de tout le spectre. Au moyen de cet enregistrement, les minéraux sont identifiés et les hauteurs de pics caractéristiques sont mesurées en vue d'un dosage semi-quantitatif.

On se sert de la calcite contenue dans l'échantillon comme étalon interne pour le dosage du quartz. La teneur en calcite est déjà déterminée par calcimétrie ; dans les échantillons ne contenant pas ou peu de calcite, ce minéral a été ajouté en quantité convenable pour permettre le dosage. Le pourcentage de quartz est déterminé par le calcul suivant :

$$A = \frac{\text{hauteur du pic du quartz}}{\text{hauteur du pic de la calcite}}$$

$$K = A \text{ dans l'étalon} \times \frac{\% \text{ calcite}}{\% \text{ quartz}}$$

$$\% \text{ quartz dans l'échantillon} = A \times \frac{\% \text{ calcite}}{K}$$

Pour déterminer la valeur de K, nous avons tracé une courbe d'étalonnage, et nous avons calculé la valeur moyenne de ce paramètre.

Les pics choisis pour ce calcul sont :

dans un cas : 1,82 Å pour le quartz et 1,87 Å pour la calcite ;

dans l'autre cas : 2,12 Å pour le quartz et 2,09 Å pour la calcite.

Nous avons obtenu les résultats sur ces deux couples de pics séparément. Donc nous avons à la fin deux séries de résultats. Les écarts entre ces deux valeurs sont de l'ordre de l'erreur admissible pour ce dosage (5 %). Dans la Figure 6, on voit un enregistrement utilisé pour le dosage du quartz.

C) Identification et dosage des argiles :

La fraction inférieure à 40 microns nous a servi pour le dosage des argiles.

Nous avons systématiquement traité cette fraction jusqu'à décalcification complète avec HCl (2 %). Après lavage, on sature l'argile en Ca^{++} avec Cl_2Ca : 5 grammes par litre (pH 9) en étapes d'une heure et demi et de douze heures. Nous avons ensuite préparé trois plaquettes orientées pour chaque échantillon, afin de nous permettre d'en passer une sans traitement, une après le traitement thermique et la troisième après le traitement à l'éthylène-glycol. Le traitement thermique est effectué pendant deux heures à 560 °C ; le traitement à l'éthylène-glycol pendant douze heures, en dessicateur dans l'atmosphère de cette substance.

- traitement à l'éthylène-glycol.

Par ce traitement, on constate un gonflement de la montmorillonite et par suite sa raie (001) passe de 14 Å à 17 Å. Aucun changement sensible n'est constaté sur les autres argiles.

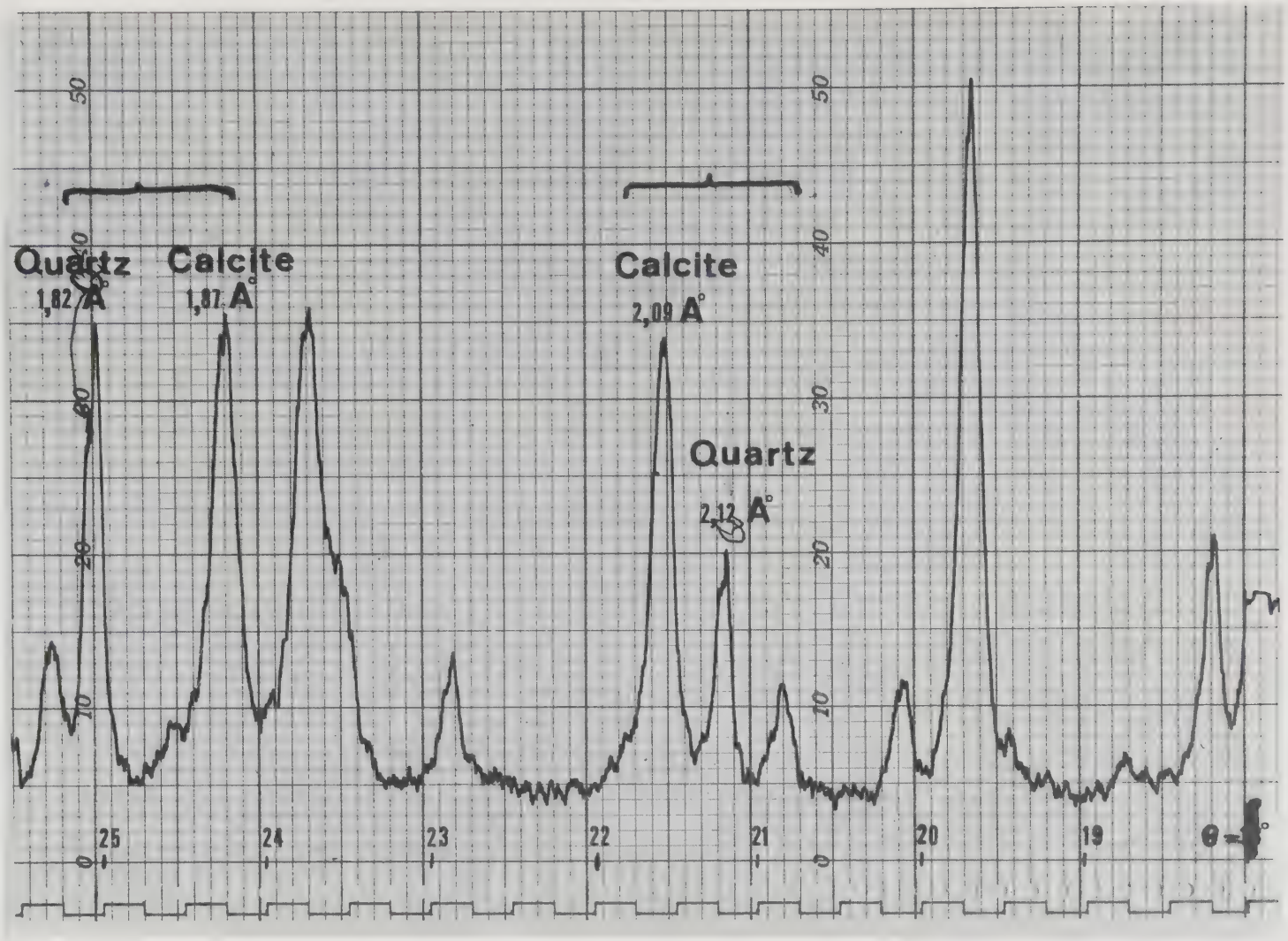
Quartz
1,82 Å
Calcite
1,87 Å
Calcite
2,09 Å
Quartz
2,12 Å
50
40
30
20
10
25
24
23
22
21
20
19

Fig. 6

- traitement thermique .

La kaolinite se décompose à la suite de ce traitement et ses raies caractéristiques disparaissent. Celles de la chlorite persistent et la raie à 14 Å s'intensifie. Comme par ailleurs la raie large de la montmorillonite se bloque à 10 Å, la chlorite peut être plus facilement mise en évidence.

Ces méthodes ont montré l'absence de la chlorite.

On a pu effectuer un dosage semi-quantitatif de la kaolinite par la hauteur du pic à 7 Å, et de l'illite par la hauteur du pic à 10 Å sur les enregistrements des échantillons traités à Cl_2Ca. Les hauteurs de pics à 17 Å de la montmorillonite, appartenant aux échantillons traités à l'éthylèneglycol, sont mesurées pour le dosage de cette argile.

Les étalons nécessaires à ce dosage sont préparés à l'aide de mélange d'argiles pures. Ces valeurs sont très approximatives, mais donnent une idée des fluctuations des teneurs. Dans la Figure 7, on voit une série d'enregistrements après différents traitements.

D) Dosage des feldspaths :

Ils ont été dosés par différence en retranchant de l'échantillon global le quartz, la calcite et les argiles.

Pour avoir une idée approximative du rapport des feldspaths potassiques et des plagioclases, nous avons mesuré la hauteur du pic du feldspath potassique à 3,24 Å, et celle du feldspath sodique à 3,20 Å sur l'enregistrement complet de l'échantillon "tout-venant". Nous avons calculé le rapport de ces deux pics pour nos échantillons.

4 - CONDITIONS OPERATOIRES :

Tous les diffractogrammes sont enregistrés par un appareil Philips, avec discrimination d'amplitude et porte-échantillon tournant, dans les conditions ci-dessous :

Rayonnement de Cu Kα (filtre de nikel), avec une tension de 40 kilovolts et un débit de 20 milliampères, une constante de temps de 2 minutes et un facteur de sensibilité 16. Les enregistrements des spectres sont effectués entre $\theta = 2$ et $\theta = 35°$.

La présence de fer dans certaines roches donne un fond continu assez important avec le rayonnement du cuivre : cela masque une partie des raies. Pour cette raison, les échantillons les plus riches en fer sont passés à nouveau avec le rayonnement du cobalt ; les résultats sont ensuite comparés. L'inconvénient de l'emploi d'un tube à anticathode de cobalt réside dans la faible puissance de ce tube (maximum 350 watts) : donc les raies sont nettement moins intenses. Grâce à la discrimination, l'inconvénient du tube à anode de cuivre disparait et par la suite, nous avons effectué les diffractogrammes au moyen de ce tube. La Figure 8 montre cette comparaison entre ces deux tubes.

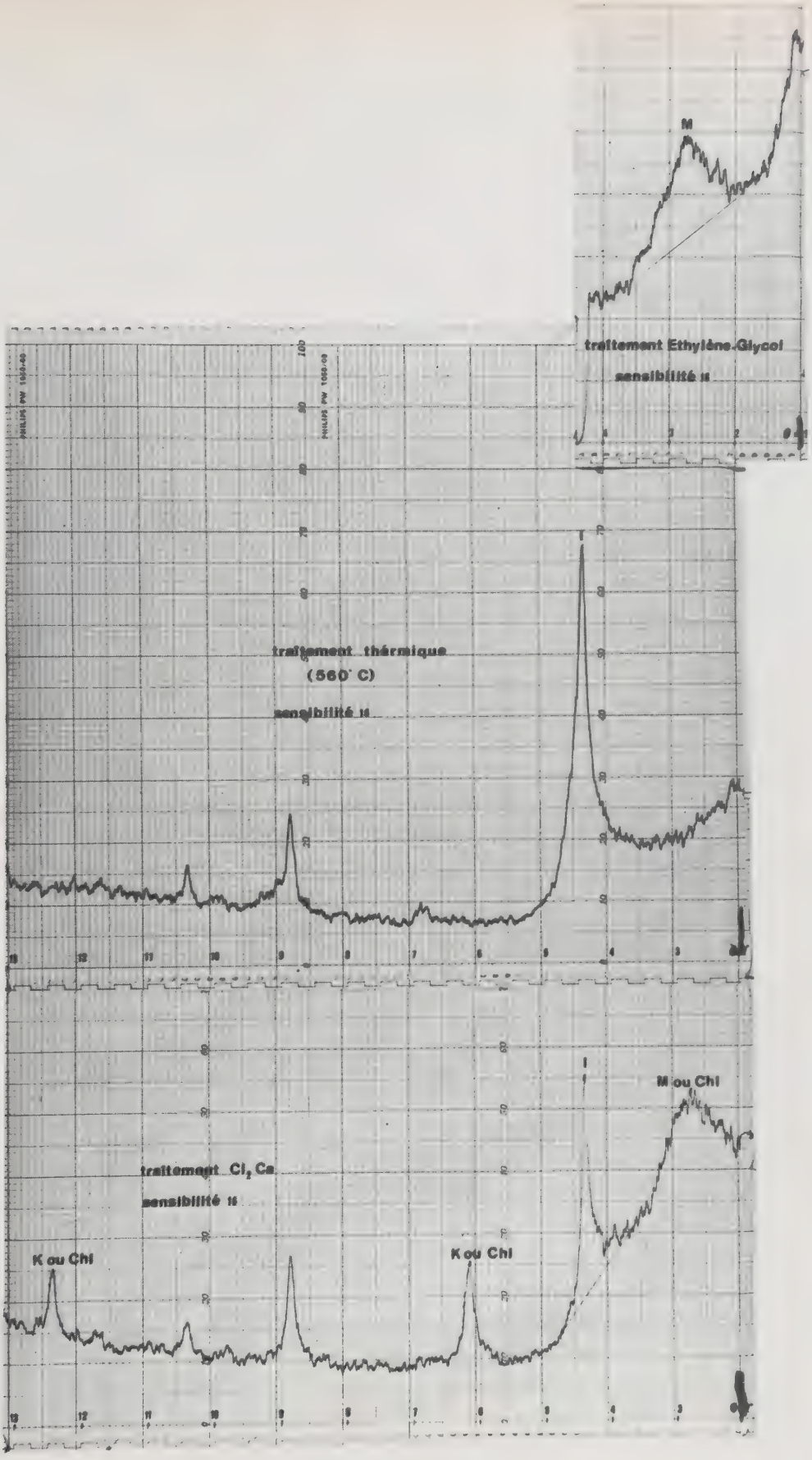
M
traitement Ethylène-Glycol
sensibilité 1s
traitement thermique
(560° C)
sensibilité 1s
M ou Chl
traitement Cl2 Ca
sensibilité 1s
K ou Chl
K ou Chl

Fig. 7

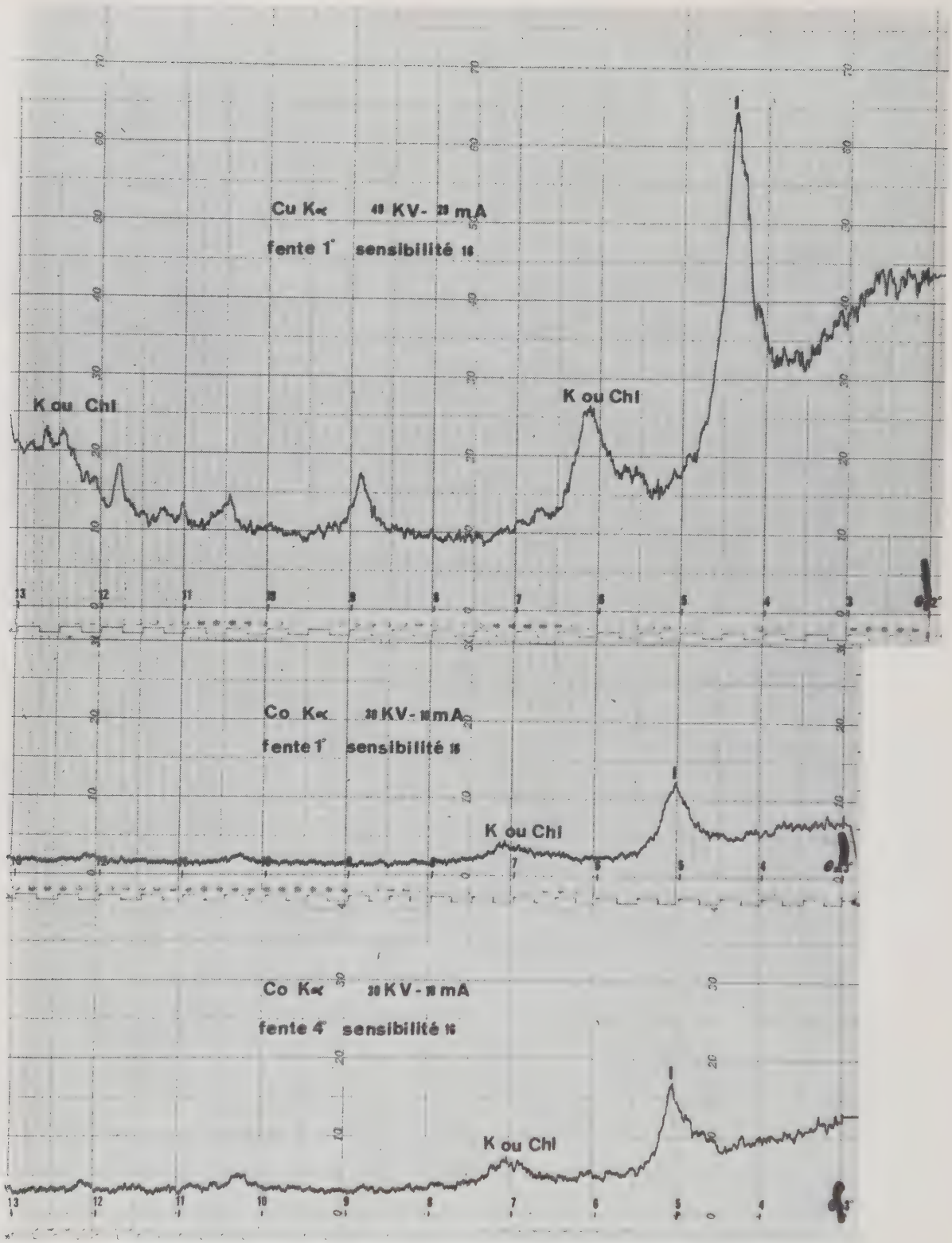
Cu Kα 40 KV- 20 mA
fente 1° sensibilité 16
K ou Chl
K ou Chl
Co Kα 30 KV- 16 mA
fente 1° sensibilité 16
K ou Chl
Co Kα 30 KV- 16 mA
fente 4° sensibilité 16
K ou Chl

Fig. 8

III - LES RÉSULTATS MINÉRALOGIQUES

1 - REPARTITION DES DIVERS MINERAUX.

Dans ce chapitre, nous décrivons les résultats correspondants aux essais expliqués dans le chapitre précédent.

Nous décrivons les résultats relatifs aux divers roches dans l'ordre où le sondage a été décrit dans le chapitre précédent : nous parlons d'abord de la série détritique sableuse, qui est constituée des dépôts plus ou moins variés, ensuite de la série détritique carbonatée, qui contient de la calcite comme minéral dominant.

A) Le socle :

D'après les dosages effectués sur les échantillons du socle, on a constaté la présence des feldspaths en abondance (pourcentage de l'ordre de 60 %). Le feldspath calco-sodique, étant toujours supérieur au feldspath potassique, diminue de bas en haut, tandis que l'autre varie en sens inverse. Le quartz varie entre 35 % et 25 % ; il diminue de bas en haut. La calcite est peu abondante, mais sa teneur atteint cependant 15 % dans une passée filonienne.

B) Les sédiments :

a) La série détritique sableuse :

Le quartz est le minéral dominant dans cette série où sa teneur atteint parfois 90 %. La calcite est très faible et sa teneur est toujours inférieure à 5 %. L'ensemble des feldspaths varie de 1 à 45 %. Le rapport entre les feldspaths sodique et potassique est constant.

Dans les argiles, on a identifié et dosé la montmorillonite, l'illite et la kaolinite. La teneur de la montmorillonite varie beaucoup et oscille entre 0 et 40 % de la phase argileuse. On la trouve près du socle, puis elle diminue et disparait très rapidement. Elle réapparait dans l'unité verdâtre argilo-sableuse près des faciès carbonatés. L'illite constitue la majeure partie de la phase argileuse ; elle subit aussi des fluctuations. Ces variations sont inverses de celles de la montmorillonite. La teneur en illite atteint parfois 98 % de la phase argileuse. La kaolinite est peu abondante et varie peu. La teneur maxima de cette argile est de 12 % de la phase argileuse.

Par l'examen macroscopique de cette série, on a trouvé des galets de granite, de la biotite en voie d'altération, de la tourmaline, très peu de muscovite et quelques petites taches de chlorite qui ne sont pas dosables.

b) La série détritique carbonatée :

Dans la partie carbonatée, la calcite est le minéral dominant. Elle varie entre 50 % et 100 %. On distingue même une passée de calcite pure au voisinage du contact carbonaté-sableux. La teneur en quartz ne dépasse pas 40 %, sauf quelques exceptions (entre 10 mètres et 18 mètres) où la teneur en quartz augmente brusquement et atteint 80 %. Les feldspaths sont moins abondants et leur teneur maximum est de 24 %.

Dans les argiles, on retrouve la montmorillonite, l'illite et la kaolinite. Le rapport des fractions inférieures à 40 microns et supérieures à 40 microns est plus grand que dans l'autre partie. La répartition du kaolin varie peu, la montmorillonite est plus également répartie et sa teneur

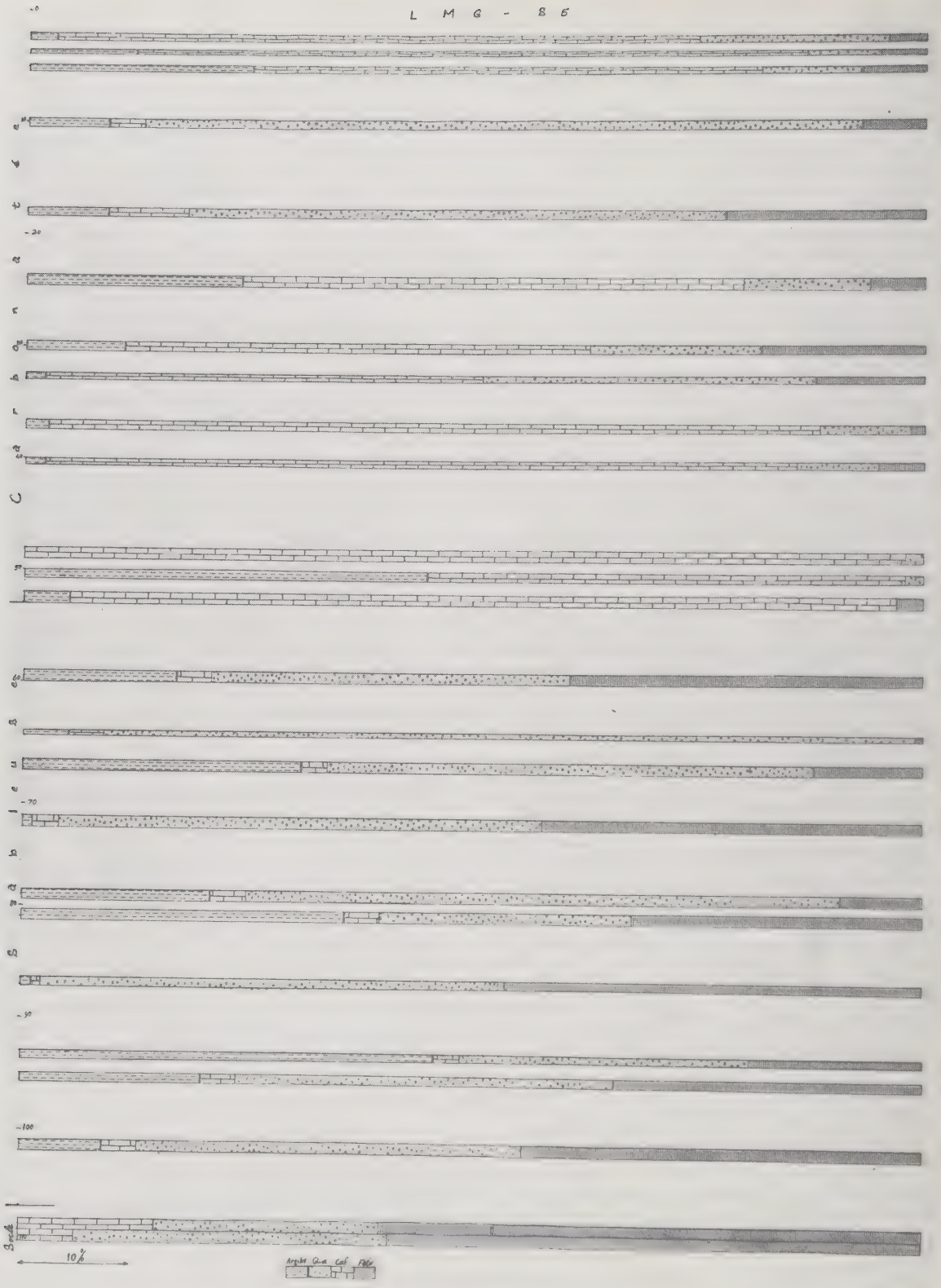

Fig. 10

maximum est de 44 %. L'illite est toujours l'argile la plus abondante avec une teneur minimum de 50 % de la phase argileuse.

Comme minéraux accessoires, on retrouve les mêmes éléments (biotite, tourmaline, etc...), mais les galets de granite deviennent de plus en plus rares.

La Figure 9 montre le diagramme triangulaire de la répartition du quartz, de la calcite et des feldspaths.

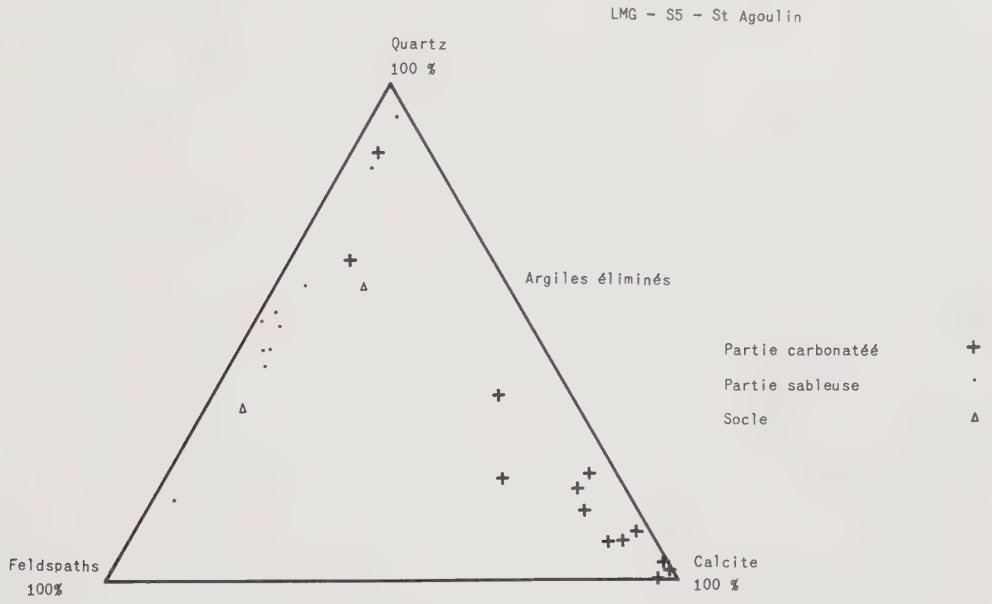

Fig. 9

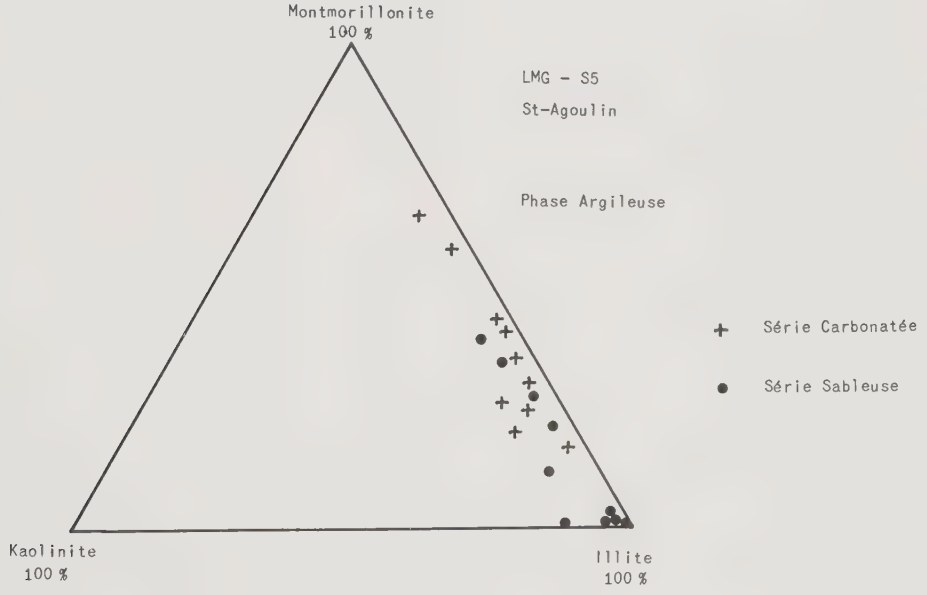

Fig. 11

TABLEAU 3

SAINT - AGOULIN (LMG-S.5)

Fluctuations minéralogiques

Référence	Profondeur mètres	Calcite (%)	Quartz (%)	Argiles (%)	Reste (Feldspaths) (%)
NAV 456	2	72	21	3	4
NAV 457	4	75	8	12	5
NAV 458	5	57	11	25	7
NAV 459	10	4	80	9	7
NAV 460	18	9	59	10	22
NAV 461	24	56	14	24	6
NAV 462	30	52	19	11	18
NAV 463	33	49	37	2	12
NAV 464	37	86	10	2,5	1,5
NAV 465	40	84	9	2	5
NAV 466	48	98	2	0	0
NAV 467	50	53	2	45	0
NAV 468	53	92	0	5	3
NAV 469	60	4	40	17	39
NAV 471	65	4	90	5	1
NAV 472	67	3	54	31	12
NAV 473	73	3	54	1	42
NAV 474	79	4	66	21	9
NAV 475	81	4	28	36	32
NAV 476	87	1	52	1	46
NAV 478	93	3	32	46	19
NAV 479	95	4	42	20	34
NAV 480	101	4	43	9	44
NAV 482	108	15	25	0	60
NAV 483	109	6	35	0	59

TABLEAU 4

SAINT - AGOULIN (LMG-S.5)

Ensemble des constituants minéralogiques
(Argiles éliminées)

Référence	Profondeur mètres	Calcite (%)	Quartz (%)	Feldspaths (%)
NAV 456	2	75	21	4
NAV 457	4	85	9	6
NAV 458	5	77	14	9
NAV 459	10	4	88	8
NAV 460	18	10	66	24
NAV 461	24	73	19	8
NAV 462	30	59	21	20
NAV 463	33	50	38	12
NAV 464	37	88	10	2
NAV 465	40	86	9	5
NAV 466	48	98	2	0
NAV 467	50	96	4	0
NAV 468	53	97	0	3
NAV 469	60	5	48	47
NAV 471	65	4	95	1
NAV 472	67	4	80	16
NAV 473	73	3	55	42
NAV 474	79	5	84	11
NAV 475	81	6	44	50
NAV 476	87	1	53	46
NAV 478	93	5	60	35
NAV 479	95	5	52	43
NAV 480	101	4	47	49
NAV 482	108	15	25	60
NAV 483	109	6	35	59

TABLEAU 5

SAINT - AGOULIN (LMG-S.5)

Fluctuations des feldspaths (hauteur de pic en mm)

Référence	Profondeur mètres	Feldspath potassique	Feldspath sodique
NAV 456	2	28	20
NAV 457	4	7	6
NAV 458	5	41	18
NAV 459	10	87	49
NAV 460	18	94	45
NAV 461	24	19	23
NAV 462	30	39	30
NAV 463	33	41	28
NAV 464	37	10	9
NAV 465	40	23	23
NAV 466	48	0	0
NAV 467	50	8	10
NAV 468	53	4	12
NAV 469	60	64	69
NAV 471	65	88	60
NAV 472	67	82	78
NAV 473	73	67	47
NAV 474	79	58	46
NAV 475	81	27	51
NAV 476	87	68	48
NAV 478	93	28	49
NAV 479	95	76	57
NAV 480	101	41	80
NAV 482	108	28	72
NAV 483	109	25	90

TABLEAU 6

SAINT - AGOULIN (LMG-S.5)

Fluctuations minéralogiques des argiles

Référence	Profondeur mètres	Montmorillonite (%)	Kaolinite (%)	Illite (%)
NAV 456	2	30	4	66
NAV 457	4	26	12	62
NAV 458	5	20	11	69
NAV 459	10	35	4	61
NAV 460	18	0	4	96
NAV 461	24	24	8	68
NAV 462	30	3	2	95
NAV 463	33	41	3	56
NAV 464	37	44	3	53
NAV 465	40	17	3	80
NAV 467	50	65	6	29
NAV 468	53	58	3	39
NAV 469	60	11	10	79
NAV 471	65	0	5	95
NAV 472	67	0	5	95
NAV 473	73	0	2	98
NAV 474	79	0	13	87
NAV 475	81	0	3	97
NAV 476	87	0	4	96
NAV 478	93	1	3	96
NAV 479	95	27	5	68
NAV 480	101	39	8	53

Dans la partie sableuse, les échantillons se répartissent le long de la ligne quartz-feldspaths, mais avec une prédominance du quartz.

Dans la partie carbonatée, la plupart des points se trouvent à proximité du pôle calcite, en raison de la forte dominance de ce minéral.

L'ensemble des Figures 4 et 10 montre tous les résultats graphiques de l'étude minéralogique.

Les résultats numériques sont marqués dans les Tableaux 3 (quartz, calcite, argiles et le reste), 4 (calcite, quartz et feldspaths) et 5 (fluctuations des feldspaths).

2 - CONDITIONS DE GENESE.

Les argiles nous servant de critères pour l'examen des conditions de remplissage de la dépression, nous distinguerons deux parties : carbonatée et non carbonatée (sableuse). Le Tableau 6 montre les proportions relatives des argiles et le diagramme triangulaire 11 est la forme graphique de ces fluctuations. Ce diagramme montre que dans les deux séries étudiées, la phase argileuse se caractérise par une très faible proportion de kaolin et des proportions variables de montmorillonite et d'illite, avec prédominance de celle-ci.

a) La série détritique sableuse :

L'association illite-montmorillonite-kaolinite en abondances variables dans les sédiments exclusivement détritiques suggère que ces argiles se sont formées sur le continent en voie d'altération et d'érosion ; l'altération se faisant suivant des modes différents, en liaison avec les climats, la topographie, l'altitude, etc... L'illite peut être en partie néoformée.

b) La série carbonatée :

L'existence des carbonates en grande abondance implique une sédimentation chimique importante, des conditions intermittentes de dépôts ; dans de telles conditions, les argiles ne sont pas seulement héritées du continent, elles peuvent être transformées et même norformées dans le bassin de sédimentation.

On retrouve, malgré cette évolution du fonctionnement du bassin, les mêmes argiles. Une étude plus poussée nous aurait peut-être permis de différencier les illites et les montmorillonites entre elles ; nous ne l'avons pas fait, faute de temps

IV - ÉTUDE GÉOCHIMIQUE - MÉTHODE DE DOSAGE

1 - DOSAGE DES ELEMENTS MAJEURS

Pour le dosage des éléments majeurs, on a utilisé d'une part la méthode de Fluorescence X, d'autre part la méthode d'analyse par voie chimique.

A) Fluorescence X :

a) Principe :

Par cette méthode, on a dosé tous les éléments majeurs à l'exception du sodium. Le dosage des échantillons se fait en trois étapes successives :

1) Enregistrement complet du spectre : Sur les poudres brutes pour la détermination qualitative des éléments, en particulier les éléments moyens et lourds de Z = 25 à Z = 92.

2) La détermination approximative des teneurs : par la comparaison des taux de comptage des échantillons et des étalons standards.

3) La détermination des teneurs réelles : elle met en jeu des étalons dont on choisit la composition pour qu'elle soit proche de celle des échantillons.

Pour ces deux derniers essais, nous avons préparé des perles au borax avec tous les échantillons, ainsi que les étalons. Dans ce dosage, on a intérêt à introduire un étalon interne dans tous les échantillons, pour éliminer différentes erreurs dues aux effets de matrice.

Les détails de cette méthode de dosage par fluorescence X seront donnés dans la deuxième thèse.

b) Appareillage :

On a réalisé le dosage au moyen d'un appareil Philips PW 1540, avec discrimination pour tous les éléments dosés. Le débit est de 18 milliampères et la tension d'excitation de 50 kilovolts. Il a fallu utiliser un tube à anode de chrome pour les éléments légers et le tube à anode de tungstène pour les éléments lourds, ainsi que les cristaux analyseurs LiF, ADP et Penta-érythrite suivant les éléments ; on emploie, suivant les cas, un compteur à scintillations ou un compteur à flux gazeux (mélange argon-méthane). On opère sous vide, pour les éléments légers et les éléments en faible teneur.

Pour chaque pic caractéristique, nous avons effectué au moins deux comptages. Le fond continu est toujours mesuré à deux endroits placés avant (pic $- \in$) et après (pic $+ \in$), le plus proche possible du pic étudié.

B) L'analyse chimique :

La méthode dont on s'est servi pour le dosage des éléments majeurs par la voie chimique, est celle mise au point par M. POUGET : "Méthode d'Analyse Chimique des Roches Silicatées", Rapport C.E.A. n° 2176 (1962). Les résultats numériques des éléments majeurs, jusqu'à P_2O_5, donnés dans le Tableau n° 7 (a), sont obtenus par cette analyse.

2 - DOSAGE DES TRACES.

Le dosage des éléments en traces, pour la plupart d'entre eux, a été effectué par spectrographie d'émission. Celui de l'uranium a été réalisé par fluorimétrie, en raison des faibles teneurs.

Le principe dont on s'est servi pour le dosage spectrométrique est le suivant : on compare les intensités des raies émises par l'échantillon à celles de produits synthétiques, préparés par mélange du SiO_2, Al_2O_3, ..., auxquels on a incorporé des quantités connues des éléments à doser. On s'arrange pour que la composition de ces étalons soit proche de celle des échantillons.

A) Appareillage :

Spectrographe à prisme de quartz "UV 120" - Huet -. Plaques B.10 et II L de Kodak couvrant 2.000 à 8.000 Å.

Excitation en arc continu, 8 ampères. Densitométrie des "raies ultimes" sur Schnell Photometer Zeiss. Trois spectres par échantillon. Reproductibilité 20 à 25 %.

B) Raies utilisées :

Pb 2833 Å - Cu 3247 Å - Zn 3345 Å - Ag 3281 Å - Ni 3050 Å - Co 3453 Å-
Cr 2843 Å - Mo 3170 Å - V 3184 Å - Sn 3175 Å - Ca 2944 Å - Hg 2536 Å
Zr 3292 Å - B 2496 Å - Be 2348 Å - As 2349 Å - Sb 2598 Å.

Ces dosages ont été réalisés dans le laboratoire de Spectrographie du Service de Minéralogie du C.E.A.

3 - LES RESULTATS :

A) Les éléments majeurs :

Les éléments majeurs dosés par l'analyse chimique sont : Si - Al - Mg - Fe^{2+} - Fe^{3+} - Ti - Ca - K - Na.

SiO_2 - Dans le socle, la teneur en SiO_2 varie entre 70 % et 50 % de bas en haut. La teneur moyenne dans la partie sableuse est plus élevée et varie entre 65 % et 80 %. Dans la partie carbonatée, la teneur est de l'ordre de 1 % minimum et 40 % maximum, sauf dans une bande où on trouve un niveau avec 80 % de silice.

Al_2O_3 - L'aluminium est très abondant dans le socle. La teneur atteint 15 %. Dans la partie sableuse, elle diminue un peu, puis, dans la zone des carbonates, varie entre 1 % et 10 %. Il est contenu principalement dans les feldspaths et les argiles.

Fe_2O_3 - On ne peut distinguer entre les familles stratigraphiques. Les teneurs sont faibles : 0,1 % à 4 %.

FeO - Sa répartition varie peu, comme pour le fer ferrique. Sa teneur oscille entre 0 % et 0,5 %.

Ca - Il est faible dans le socle (4 % à 10 %). Dans la partie sableuse, il est très faible et ne dépasse pas 2,5 %, La partie carbonatée est très riche évidemment, avec un maximum de 52 % (équivalent à 93 % de calcite).

MgO - Les variations sont irrégulières et de l'ordre de 2 % à 0,02 %.

Na_2O - Les teneurs les plus fortes en sodium se trouvent dans le socle et les plus faibles dans la partie carbonatée (ceci est en relation avec les feldspaths). Le maximum est de 4 % dans le socle et les sables, et de 2,5 % dans la partie carbonatée.

K_2O - Le potassium est sensiblement distribué comme le silicium. La teneur oscille entre 0,25 % et 6 %.

TiO_2 - Les teneurs sont variables entre 0,6 % et 0,5 % dans le socle ; 0,5 % et 0,01 % dans les sables et 0,3 % à 0,01 % dans les carbonates. Dans cette partie, il y a une relation entre TiO_2 et Fe_2O_3.

MnO - Il est faible (0,01 % et 0,1 %) dans les échantillons que nous avons étudiés.

P_2O_5 - Il varie entre 0,7 % et 0,1 %.

B) Les éléments mineurs :

- Le baryum oscille entre 0,5 % et 0,05 %.

Les autres éléments sont beaucoup plus faibles :

- Le strontium entre 50 et 200 p.p.m.

- Le rubidium, souvent non détecté, de 0 à 200 p.p.m.

- Le vanadium atteint 200 p.p.m.

- Pour les autres éléments (Pb, Cu, Ni, Co, Be, B, Zr), les teneurs sont inférieures à 100 p.p.m.

- L'uranium est toujours inférieur à 100 p.p.m. Dans la plupart des cas, il est de l'ordre de quelques p.p.m. Les seules anomalies se situent dans la partie carbonatée supérieure et au contact des carbonates et de la partie sableuse.

Dans les Tableaux 7 (a) à 7 (c) et la Figure 12, on voit les résultats. Nous avons donné les valeurs en pourcentage pour l'analyse chimique et en p.m.m. (sauf Ba) pour les analyses de fluorescence X, spectrographiques et fluorimétriques. Les éléments majeurs ont été dosés par chimie, le baryum, le strontium et le rubidium par fluorescence X, le plomb, le cuivre, le nikel, le cobalt, le vanadium, le béryllium, le bore et le zirconium par spectrographie d'émission et l'uranium par fluorimétrie.

Le Tableau 8 montre les moyennes arithmétiques des éléments.

TABLEAU 7 (a)

SAINT - AGOULIN (LMG-S.5) Analyse Chimique (Teneurs en %)

REF.	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	MnO	P_2O_5	H_2O^-	Perte au feu	TOTAL
456	20,56	3,96	1,06	0	38,25	1,99	0,65	1,60	0,02	0,10	0,19	0,27	30,97	99,62
457	15,60	4,38	1,42	0,12	39,91	1,19	0,22	1,15	0,10	0,06	0,17	1,05	34,33	99,70
458	25,10	5,90	2,37	0,11	32,15	1,99	0,37	2,10	0,10	0,06	0,17	2,17	26,61	99,20
459	76,87	9,78	0,94	0,10	1,33	0,20	2,40	5,90	0,02	0,01	0,10	0,70	1,38	99,73
460	78,03	8,27	0,94	0,05	2,00	0,06	1,82	5,67	0,02	0,01	0,14	0,98	1,75	99,74
461	31,46	5,50	2,45	0,15	27,72	0,79	0,85	2,40	0,18	0,07	0,20	3,62	24,04	99,43
462	28,65	7,51	1,73	0,05	31,60	0,20	0,83	1,95	0,05	0,04	0,25	1,06	25,64	99,56
463	40,02	5,19	0,87	0	27,16	0,38	1,03	2,50	0,01	0,08	0,21	0,45	21,61	99,51
464	8,76	4,18	0,63	0,10	45,46	0,38	0,21	0,60	0,02	0,01	0,21	1,88	37,20	99,64
465	12,12	2,72	0,15	0,41	44,90	2,00	0,45	0,83	0,02	0,02	0,17	0,29	35,63	99,71
466	1,56	1,61	0,63	0,05	52,11	0,20	0,15	0,25	0,01	0,08	0,06	1,12	41,80	99,63
467	27,12	8,67	3,00	0,03	28,82	0,20	0,40	2,02	0,28	0,07	0,20	3,50	25,20	99,51
468	6,38	2,01	0,87	0,06	48,23	0,20	0,22	0,40	0,01	0,04	0,16	1,56	39,24	99,38
469	71,53	14,32	0,86	0,14	0,94	0,02	3,05	5,15	0,05	0,01	0,07	0,65	2,52	99,31
471	76,56	8,22	0,59	0,14	0,88	0,20	2,10	4,85	0,01	0,01	0,13	4,61	1,28	99,58
472	69,23	13,26	2,29	0,20	0,72	0,27	2,70	5,85	0,18	0,02	0,17	3,30	1,22	99,41
473	73,56	13,72	1,81	0,03	1,05	0,02	2,55	5,60	0,01	0,01	0,11	0,35	0,73	99,55
474	76,86	9,28	0,24	0,12	0,61	0,04	2,55	5,90	0,14	0,01	0,10	1,02	2,55	99,42
475	61,23	15,68	4,18	0,15	1,60	0,87	2,30	5,85	0,21	0,02	0,72	2,87	3,98	99,66
476	79,56	9,23	0,71	0,03	0,55	0,20	2,40	5,40	0,05	0,01	0,13	0,48	0,69	99,44
478	65,10	14,98	3,37	0,43	1,33	1,55	3,03	5,20	0,50	0,06	0,21	0,60	2,82	99,20
479	67,56	13,87	2,76	0,14	1,05	0,47	2,85	5,45	0,23	0,01	0,18	1,22	3,68	99,47
480	66,53	13,72	2,60	0,57	2,55	0,08	3,80	5,00	0,23	0,02	0,19	0,23	4,73	100,25
482	55,63	12,66	2,37	1,30	8,98	1,79	3,00	3,65	0,48	0,08	0,15	0,37	8,77	99,23
483	63,46	13,52	2,29	1,98	2,88	2,07	4,17	4,00	0,47	0,06	0,18	0,57	3,84	99,49

TABLEAU 7 (b)

SAINT-AGOULIN (LMG-S.5)

Analyses de Fluorescence X, spectrographiques et fluorimétriques

(Teneurs en p.p.m.)

REFER.	Ba	Sr	Rb	Pb	Cu	Ni	Co	V	Be	B	Zr	U
456	0,10 %	100	50	48	5	11	10	140	2	0	20	68
457	0,05 %	100	50	20	1	11	10	190	2	0	0	89
458	0,10 %	100	100	35	12	11	10	120	2	0	20	27
459	0,50 %	200	200	62	20	10	20	100	1	13	20	2
460	0,20 %	200	100	52	20	11	20	56	1	5	20	2
461	0,05 %	200	100	42	15	11	10	130	2	5	20	5
462	0,10 %	200	50	40	15	13	10	150	2	5	20	3
463	0,10 %	100	50	30	5	0	10	58	0	0	20	4
464	0,05 %	200	0	10	15	0	5	66	0	0	0	8
465	0,05 %	200	0	12	12	0	10	70	0	0	0	5
466	0,02 %	100	0	9	15	0	10	70	0	0	0	5
467	0,05 %	200	100	28	15	20	10	190	3	5	20	4
468	0,05 %	200	0	34	1	10	10	150	2	0	0	2
469	0,10 %	100	200	58	20	10	10	60	3	10	20	4
471	0,10 %	100	200	63	50	0	20	30	0	13	20	2
472	0,10 %	100	200	62	100	13	10	66	6	27	20	3
473	0,10 %	100	200	62	30	0	66	22	1	15	20	2
474	0,10 %	100	200	68	30	0	12	40	3	20	20	3
475	0,10 %	100	200	48	35	24	5	64	8	30	20	5
476	0,10 %	100	200	70	40	0	45	16	1	22	20	2
478	0,10 %	200	200	33	40	15	8	44	2	25	20	4
479	0,10 %	100	200	35	10	10	10	29	3	30	20	3
480	0,10 %	200	200	27	10	12	10	50	2	25	26	4
482	0,05 %	200	100	31	10	18	10	65	1	0	20	4
483	0,10 %	100	100	36	10	26	20	85	1	0	20	5

TABLEAU 7 (c)

SAINT - AGOULIN (LMG-S.5)

Analyse Diffractométrique

Référ.	Montmorillonite (%)	Kaolinite (%)	Illite (%)	Calcite (%)	Quartz (%)	Feldspath potassique	Feldspath sodique
						Hauteur du pic en mm	
456	30	4	66	72	21	28	20
457	26	12	62	75	8	7	6
458	20	11	69	57	11	41	18
459	35	4	61	4	80	87	49
460	0	4	96	9	60	94	45
461	24	8	68	56	14	19	23
462	3	2	95	52	19	39	30
463	41	3	56	49	37	41	28
464	44	3	53	86	10	10	9
465	17	3	80	84	9	23	23
466	0	0	0	98	0	0	0
467	65	6	29	53	9	8	10
468	58	3	39	92	0	4	12
469	11	10	79	4	40	64	69
471	0	5	95	4	90	88	60
472	0	5	95	3	54	82	78
473	0	2	98	3	54	67	47
474	0	13	87	4	66	58	46
475	0	3	97	4	28	27	51
476	0	4	96	1	52	68	48
478	1	3	96	3	32	28	49
479	27	5	68	4	42	76	57
480	39	8	53	4	43	41	80

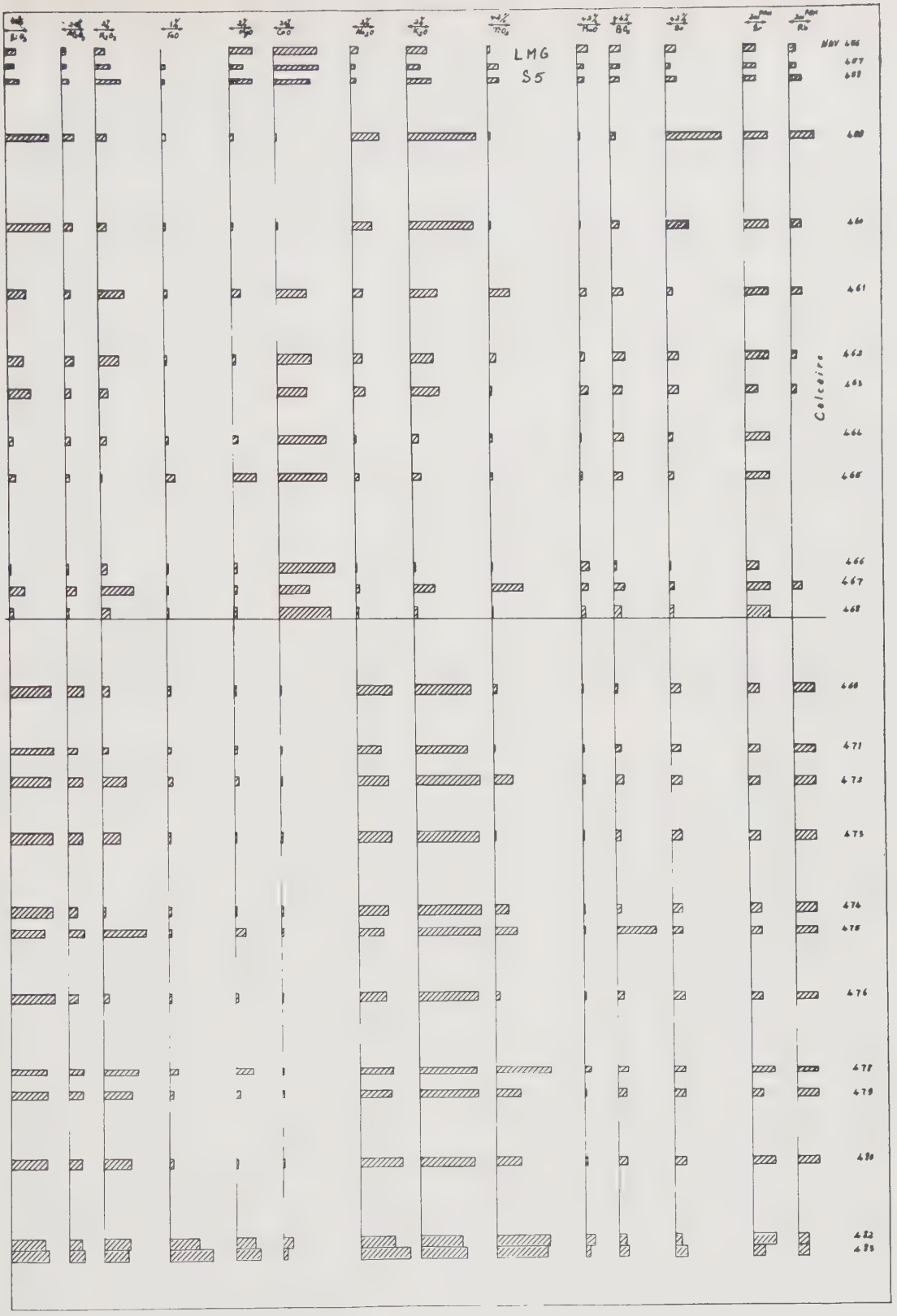

Fig. 12

TABLEAU 8

SAINT - AGOULIN (LMG-S.5)

Moyennes arithmétiques (abondances)

Eléments dosés	Famille carbonatée	Famille sableuse	Ensemble
SiO_2	19,8 %	71,9 %	41,11 %
Al_2O_3	4,7 "	12,0 "	
Fe_2O_3	1,4 "	1,8 "	
FeO	0,1	0,2	
CaO	37,8	1,2	23,28
MgO	0,9	0,3	
Na_2O	0,5	2,6	
K_2O	1,4	5,5	
TiO_2	0,1	0,1	
MnO	0,1	0	
P_2O_5	0,2	0,2	
Ba	0,11	0,1	
Sr	154 p.p.m.	133 p.p.m.	
Rb	71 "	192 "	
Pb	28	53	
Cu	10	34	
Ni	12	13	
Co	9	20	
V	121	48	
Be	2	3	
B	5	20	
Zr	20	20	
U	20	3	
Montmorillonite	33 %	3 %	
Kaolinite	5,5 %	5,5 %	
Illite	61,7	85,1	
Calcite	70	4	
Quartz	15	53	
Hauteur du pic — Feldspath K	22 mm	65 mm	
Hauteur du pic — Feldspath Na	18 mm	57 mm	

V - RELATIONS ENTRE LES ABONDANCES DES ÉLÉMENTS MAJEURS, MINEURS ET LES CONSTITUANTS MINÉRALOGIQUES

D'après les résultats de diffraction X et ceux des différentes méthodes d'analyse chimique, on a observé des relations entre les abondances de certains éléments chimiques et certains constituants minéralogiques. A la suite de ces observations, il nous a semblé qu'un calcul des coefficients de corrélation était utile.

1 - PRINCIPE DE LA METHODE DE CALCUL :

Nous avons cherché les corrélations deux à deux entre les différents éléments chimiques et minéralogiques, au moyen d'une machine I.B.M., en lui demandant les nuages de corrélation (échelle logarithmique). Puis nous avons recherché les coefficients de corrélation en leur appliquant le test de Student, afin de garder seulement les corrélations significatives.

2 - LES RESULTATS.

Etant donné que nos échantillons forment deux groupes distincts, l'un sableux riche en quartz, l'autre riche en carbonate, nous avons séparé les deux groupes dans l'analyse statistique des données.

Sur les nuages, on a essayé de tracer des droites de corrélation. Pour avoir une plus grande exactitude, on a éliminé les corrélations les moins probables au test de 95 %. Les Tableaux 9 et 10 correspondent à ces deux séries de corrélations, et les Figures 13 et 14 montrent les corrélations les plus parfaites. Dans ces Tableaux, les chiffres positifs montrent les corrélations directes, et les chiffres négatifs les corrélations inverses. Plus la valeur absolue du coefficient est voisine de l'unité, plus la corrélation est bonne.

On trouve bien évidemment une corrélation parfaite, surtout dans la partie calcaire, entre le calcium, la calcite et la perte au feu. Cela traduit la participation complète de calcium dans la formation de la calcite, et que la perte au feu est due, dans sa plus grande partie, à la dissociation de la calcite ; la présence de matières organiques ou de corps se décomposant en-dessous de 1000 °C (par exemple : sulfure de fer, ...) est exclus. Dans ces conditions, nous discuterons seulement des corrélations avec le calcium.

Les teneurs en bore et en baryum de la plupart des échantillons étaient tellement faibles qu'on n'a réussi à doser ces éléments que dans quelques échantillons ; par conséquent, nous ne les introduirons pas dans cette liste de corrélations.

On peut classer les corrélations différemment pour les étudier. Nous allons donc voir successivement deux familles :

A) La partie sableuse :

Il y a deux sortes de corrélations : directes et inverses.

TABLEAU 9

TABLEAU DES COEFFICIENTS DE CORRELATION (Test 95 %)

Famille sableuse

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	CaO	MgO	Na_2O	TiO_2	MnO	P_2O_5	Ba	Sr	Pb	Ni	V	Qua	$Fel_{(K)}$	$Fel_{(Na)}$	
1, 00	-0, 90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0, 73	-	-	0, 76	0, 73	-	SiO_2
	1, 00	0, 82	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0, 83	-0, 68	-	Al_2O_3
		1, 00	-	-	0, 72	-	0, 73	-	0, 75	-	-	-0, 71	-	-	-0, 75	-0, 67	-	Fe_2O_3
			1, 00	-	-	0, 80	0, 72	0, 65	-	-	-	-0, 77	-	-	-	-	-	FeO
				1, 00	-	-	-	-	-	-	0, 73	-0, 71	-	-	-	-	-	CaO
					1, 00	-	0, 84	0, 88	-	-	-	-	-	-	-	-	-	MgO
						1, 00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0, 64	Na_2O
							1, 00	0, 88	-	-	-	-0, 72	-	-	-0, 64	-0, 72	-	TiO_2
								1, 00	-	-	-	-	-	-	-	-0, 64	-	MnO
									1, 00	-	-	-	0, 96	-	-	-	-	P_2O_5
										1, 00	-	-	-	0, 72	-	-	-	Ba
											1, 00	-	-	-	-	-	-	Sr
												1, 00	-	-	-	-	-	Pb
													1, 00	-	-	-	-	Ni
														1, 00	-	-	-	V
															1, 00	0, 74	-	Qua
																1, 00	-	$Fel_{(K)}$
																	1, 00	$Fel_{(Na)}$

TABLEAU 10

TABLEAU DES COEFFICIENTS DE CORRELATION (Test 95 %)

Famille carbonatée

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	Ba	Rb	Mon	lll	Cal	Qua	$Fel_{(K)}$	$Fel_{(Na)}$	
1, 00	0, 75	-	-	-0, 97	-	0, 86	0, 98	-	-	-	-	-	-	-0, 97	-	-	-	SiO_2
	1, 00	0, 81	-	-0, 85	-	-	0, 78	0, 72	0, 69	-	-	-	-	-0, 88	-	-	-	Al_2O_3
		1, 00	-	-0, 73	-	-	0, 67	0, 89	-	-	0, 91	-	-	-0, 70	-	-	-	Fe_2O_3
			1, 00	-	0, 74	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	FeO
				1, 00	-	-0, 76	-0, 99	-	-0, 67	-	-	-	-	0, 99	-	-	-	CaO
					1, 00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	MgO
						1, 00	0, 80	-	-	-	-	-	-	-0, 76	0, 82	0, 69	0, 88	Na_2O
							1, 00	-	-	-	-	-	-	-0, 97	-	0, 63	-	K_2O
								1, 00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	TiO_2
									1, 00	-	-	-	-	-0, 69	-	-	-	P_2O_5
										1, 00	-	-	-	-	-	-0, 89	-	Ba
											1, 00	-	-	-	-	-	-	Rb
												1, 00	-0, 98	-	-	-	-	Mon
													1, 00	-	-	-	-	lll
														1, 00	-	-	-	Cal
															1, 00	-	-	Qua
																1, 00	0, 82	$Fel_{(K)}$
																	1, 00	$Fel_{(K)}$

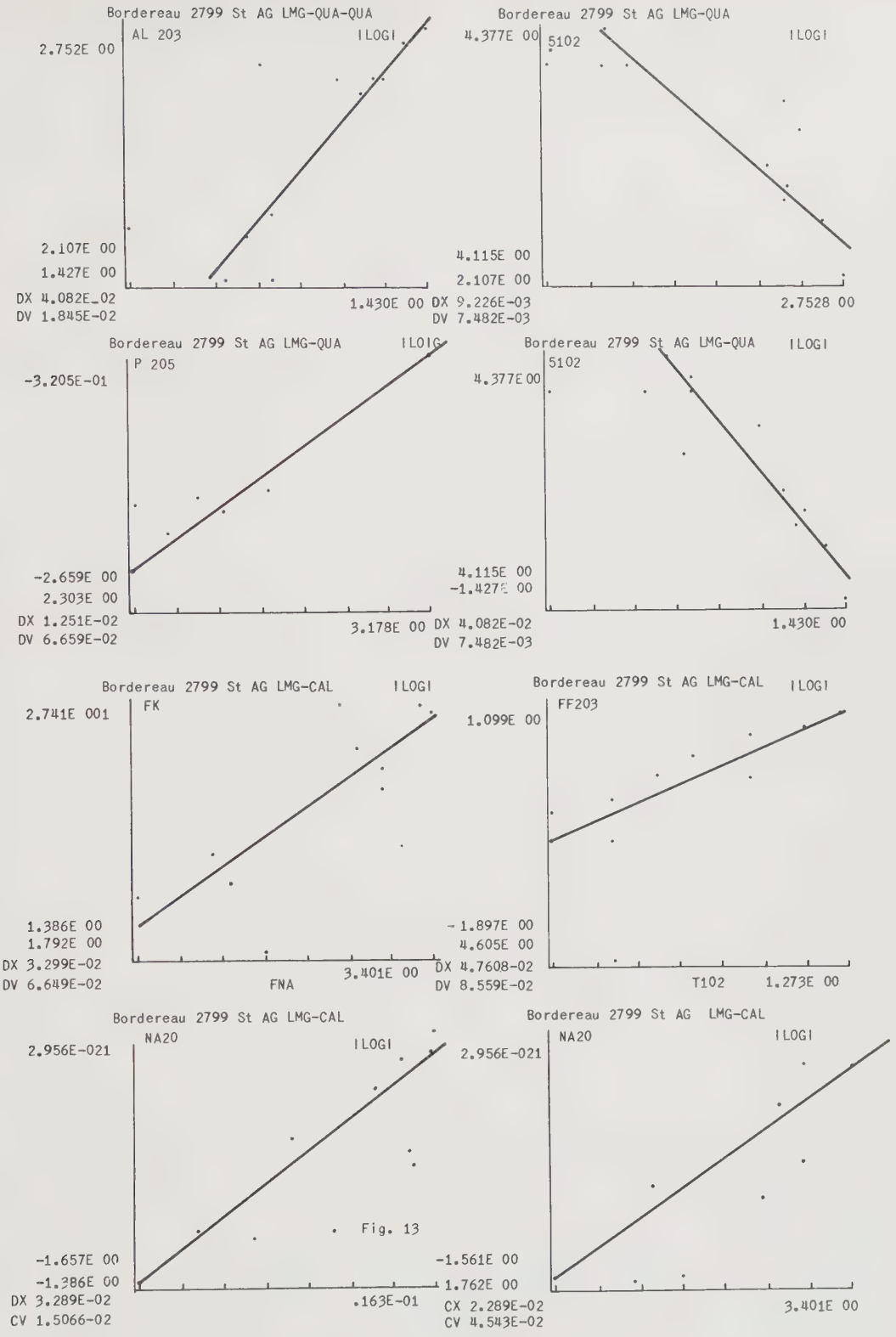
Bordereau 2799 St AG LMG-QUA-QUA
AL 203
ILOGI
2.752E 00
2.107E 00
1.427E 00
DX 4.082E-02
DV 1.845E-02
1.430E 00
Bordereau 2799 St AG LMG-QUA
5102
ILOGI
4.377E 00
4.115E 00
2.107E 00
DX 9.226E-03
DV 7.482E-03
2.7528 00
Bordereau 2799 St AG LMG-QUA
P 205
ILOIG
-3.205E-01
-2.659E 00
2.303E 00
DX 1.251E-02
DV 6.659E-02
3.178E 00
Bordereau 2799 St AG LMG-QUA
5102
ILOGI
4.377E00
4.115E 00
-1.427E 00
DX 4.082E-02
DV 7.482E-03
1.430E 00
Bordereau 2799 St AG LMG-CAL
FK
ILOGI
2.741E 001
1.386E 00
1.792E 00
DX 3.299E-02
DV 6.649E-02
FNA
3.401E 00
Bordereau 2799 St AG LMG-CAL
FF203
ILOGI
1.099E 00
- 1.897E 00
4.605E 00
DX 4.7608-02
DV 8.559E-02
T102
1.273E 00
Bordereau 2799 St AG LMG-CAL
NA20
ILOGI
2.956E-021
-1.657E 00
-1.386E 00
DX 3.289E-02
CV 1.5066-02
.163E-01
Bordereau 2799 St AG LMG-CAL
NA20
ILOGI
2.956E-021
-1.561E 00
1.762E 00
CX 2.289E-02
CV 4.543E-02
3.401E 00

Fig. 13

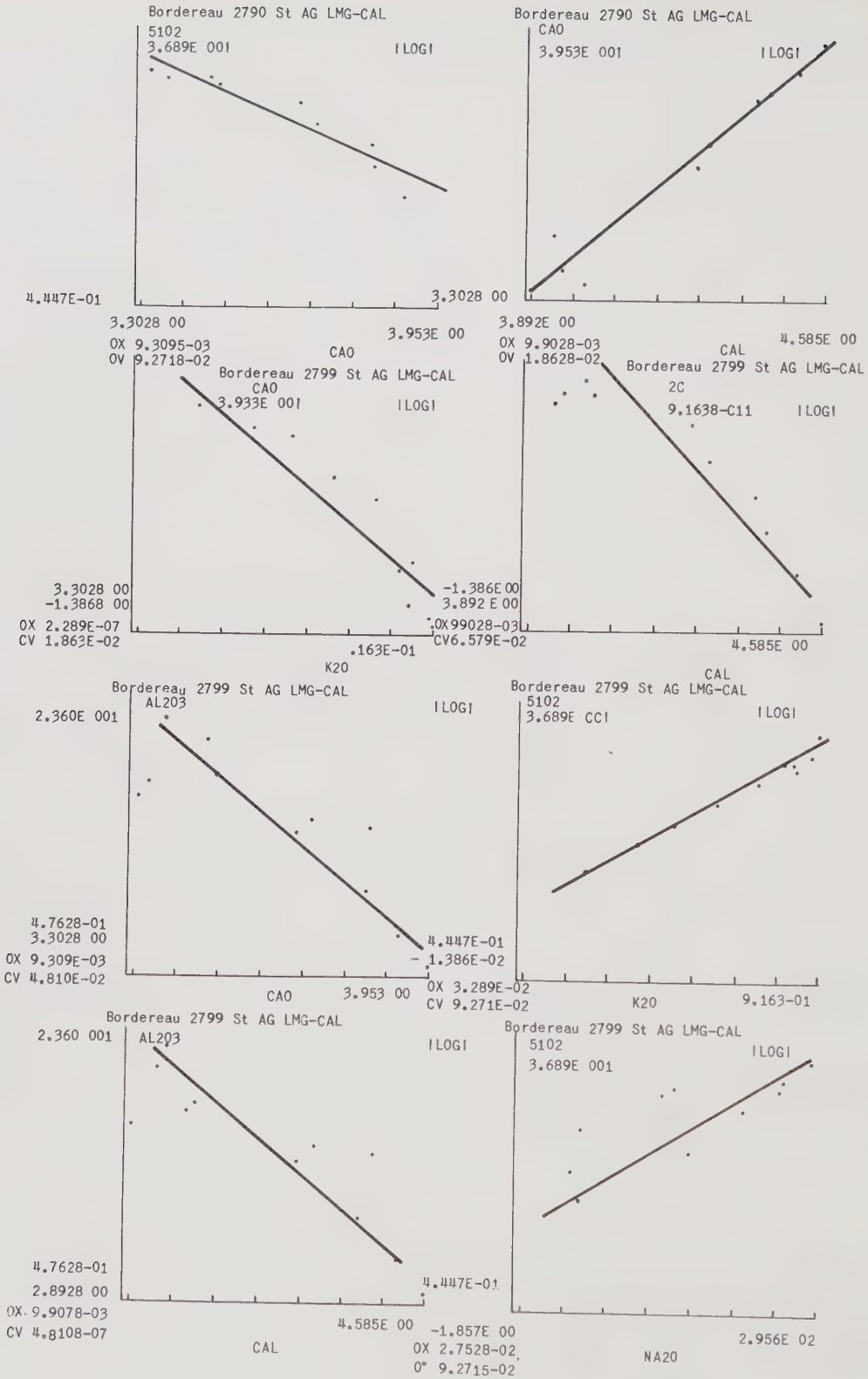
Bordereau 2790 St AG LMG-CAL
5102
3.689E 001
ILOGI
4.447E-01
3.3028 00
Bordereau 2790 St AG LMG-CAL
CAO
3.953E 001
ILOGI
3.3028 00
3.953E 00
3.892E 00
4.585E 00
OX 9.3095-03
OV 9.2718-02
CAO
OX 9.9028-03
OV 1.8628-02
CAL
Bordereau 2799 St AG LMG-CAL
CAO
3.933E 001
ILOGI
Bordereau 2799 St AG LMG-CAL
2C
9.1638-C11
ILOGI
3.3028 00
-1.3868 00
-1.386E 00
3.892 E 00
OX 2.289E-07
CV 1.863E-02
.163E-01
K20
OX99028-03
CV6.579E-02
4.585E 00
CAL
Bordereau 2799 St AG LMG-CAL
AL203
2.360E 001
ILOGI
Bordereau 2799 St AG LMG-CAL
5102
3.689E CC1
ILOGI
4.7628-01
3.3028 00
OX 9.309E-03
CV 4.810E-02
4.447E-01
- 1.386E-02
CAO
3.953 00
OX 3.289E-02
CV 9.271E-02
K20
9.163-01
Bordereau 2799 St AG LMG-CAL
AL203
2.360 001
ILOGI
Bordereau 2799 St AG LMG-CAL
5102
3.689E 001
ILOGI
4.7628-01
2.8928 00
OX 9.9078-03
CV 4.8108-07
4.585E 00
4.447E-01
CAL
-1.857E 00
OX 2.7528-02
0° 9.2715-02
2.956E 02
NA20

Fig. 14

a) Corrélations directes :

- Fe^{3+} avec Al, Mg, Ti, P.
- Fe^{2+} avec Na, Ti, Mn, Zr.
- Pb avec Si
- Sr et Zr avec Ca.
- Na avec Zr et le feldspath sodique.
- P avec Ni.
- Ba avec V.
- Mg et Ti et Mn sont corrélés deux à deux.
- Si, Quartz et Feldspath potassique sont corrélés deux à deux.

b) Corrélations inverses :

- Si avec Al, Fe^{3+}, Mg, Ti, P.
- Pb avec Fe^{3+}, Fe^{2+}, Ca, Ti.
- Quartz avec Al, Fe^{3+}, Ti.
- Le feldspath potassique se comporte comme le quartz, et en plus il est inversement corrélé avec Mn.

B) La partie carbonatée :

a) Corrélations directes :

- Si avec Al, Na, K.
- Al avec Fe^{3+}, K, Ti, P.
- Fe^{3+} avec Ti, Rb, K.
- Na avec K, Quartz et Feldspath sodique.
- K avec Feldspath potassique.
- Na, K, Feldspaths sodique et potassique sont liés deux à deux.

b) Corrélations inverses :

- Ca avec Si, Al, Fe^{3+}, Na, K, P.
- Ba avec Feldspath potassique.
- Montmorillonite avec Illite.

3 - DISCUSSION :

A) Corrélations inverses :

Certaines sont plus logiques et significatives.

Les corrélations correspondant au silicium dans la partie sableuse sont les plus nombreuses. Le quartz étant généralement dominant et la teneur en SiO_2 toujours plus faible dans les silicates, ceux-ci varient en sens inverse du quartz donc du SiO_2 ; de même pour la plupart des éléments chimiques.

Dans la partie carbonatée, le calcium est l'élément dominant et par conséquent les teneurs des autres éléments majeurs varient en sens inverse de celui-ci, et pour cette raison, la corrélation est inverse entre le calcium et la plupart des éléments majeurs.

La relation inverse entre la montmorillonite et l'illite peut s'expliquer par le fait que l'illite peut se former aux dépens de la montmorillonite, ou encore, que les conditions d'altération du continent favorisent la formation tantôt de l'un, tantôt de l'autre.

B) Corrélations directes :

Nous étudierons maintenant les corrélations directes qui sont plus intéressantes et nous en donnerons la raison.

Certaines de ces relations peuvent s'expliquer par les règles de Goldschmidt. Elles mettent en jeu les rayons ioniques. Les éléments ayant des rayons ioniques dont la différence est de l'ordre de 15 % au moins, varient de façon semblable dans les sédiments, même s'ils ont des propriétés chimiques différentes. Le Tableau 11 montre des rayons ioniques de quelques éléments.

TABLEAU 11

Tableau des rayons ioniques

Eléments	r (Å)	Eléments	r (Å)
P^{5+}	0, 35	Fe^{2+}	0, 74
Si^{4+}	0, 42	Ti^{3+}	0, 76
Al^{3+}	0, 51	Mn^{2+}	0, 80
V^{5+}	0, 59	Na^{+}	0, 97
Mn^{4+}	0, 60	Ca^{2+}	0, 99
Fe^{3+}	0, 64	Sr^{2+}	1, 12
Mg^{2+}	0, 66	K^{+}	1, 33
Ti^{4+}	0, 68	Ba^{2+}	1, 34
Ni^{2+}	0, 69	Rb^{+}	1, 47
V^{3+}	0, 74		

Les corrélations satisfaisant à ces règles sont les suivantes :

- partie carbonatée.

Fe^{3+} - Ti, Fe^{3+} - Al, Si - Al, Ti - Al.

- partie sableuse.

Fe^{3+} - Ti, Fe^{3+} - Mg, Fe^{3+} - Al.

Fe^{2+} - Ti, Fe^{2+} - Mn, Fe^{2+} - Zr.

Ti - Mn, Ti - Mg, Mg - Mn, Ca - Sr, Na - Zr, Ca - Zr, et, avec approximation, on peut aussi prendre Fe^{2+} - Na comme satisfaisante.

Les corrélations Fe^{3+} - Ti et Fe^{3+} - Al sont les plus valables, parce qu'elles existent dans les deux séries sédimentaires. Le baryum et le rubidium sont surtout liés aux feldspaths et le strontium aux carbonates.

Certaines corrélations s'expliquent par les règles de Goldschmidt, mais aussi par des propriétés chimiques voisines. Un exemple est donné par le calcium et le strontium dans la partie carbonatée.

Parmi les corrélations non expliquées par ces règles, la relation entre Na et K est justifiée par les propriétés chimiques voisines des alcalins. D'autres corrélations sont dues aux conditions minéralogiques. La corrélation sodium-plagioclase s'explique par le fait que la plus grande partie du Na est dans la structure des plagioclases ; quand ceux-ci sont détruits par l'altération, le sodium est libéré et n'est pas repris dans une autre structure et s'échappe du bassin non confini.

- Dans la partie sableuse, la relation Si-Quartz donne une idée de la faible teneur des argiles et des feldspaths. Les relations Si-Feldspath potassique et Quartz-Feldspath potassique montrent que les feldspaths ont été peu altérés, en particulier le feldspath potassique.

- Dans la partie carbonatée, on tient compte des deux conditions suivantes :

- Les conditions d'altération des feldspaths ont été différentes de la partie sableuse. Les deux feldspaths ont subi le même sort ; ce qui explique la relation "feldspath sodique-feldspath potassique" ;

- Le calcium étant l'élément dominant, le quartz est faible ; le silicium a servi surtout à la formation des feldspaths et des argiles. La corrélation directe K-feldspath potassique signifie que tout le potassium se trouve dans le feldspath potassique. Le bassin n'est pas encore fermé, par conséquent les sels potassiques sont drainés.

C) Corrélations non expliquées :

Il reste des couples, tels que :

Fe^{3+} - Rb, Fe^{3+} - K, Ba - Feldspath potassique, Fe^{3+} - P, Si - Pb, P - Ni, Ba - V et quelques autres qui ne sont pas expliqués. Entre ces ensembles, ceux qui correspondent à Pb, Ni, Ba et Rb sont arrivés par hasard, parce que ces éléments ne sont pas dosés avec la même précision que les autres, en raison de leurs faibles teneurs. En éliminant cela, il ne reste seulement que les corrélations directes Fe^{3+} - K (partie carbonatée) et Fe^{3+} - P (partie sableuse) qui restent inexpliquées.

VI - CYCLE SÉDIMENTAIRE DE SAINT-AGOULIN

1 - ALTERATION DU SOCLE :

Au début de l'oligocène, le climat était chaud et pluvieux dans le Massif Central. L'histoire des sédiments de la dépression de Saint-Agoulin commence à cette époque-là. Ce climat favorise l'altération du socle cristallin et à la suite de ce phénomène physique assez intense, les minéraux seraient plus ou moins dégradés, en fonction de leur résistance. L'oligoclase et la biotite sont complètement altérés, le feldspath potassique faiblement, et le quartz est intact.

Le résultat de cette altération est l'abondance des minéraux résistants comme le quartz et le feldspath potassique, la génèse des minéraux hérités du continent par l'altération des feldspaths et des micas. L'existence de biotite très dégradée est un témoin de cette altération.

2 - FORMATION DES SEDIMENTS :

La composition de la phase détritique dans deux familles est différente. Ceci est dû soit à des conditions d'apport différentes, soit à des conditions d'altération différentes. On distingue deux séries de sédiments :

A) Série détritique sableuse :

Plusieurs lacs se sont formés en bordure de la Limagne. La dépression de Saint-Agoulin fait partie de ces lacs. En raison des fortes pluies et des autres conditions atmosphériques, l'érosion a atteint le socle ; les produits d'altération du socle sont entraînés vers la dépression par des cours d'eau

Les minéraux résiduels lourds se déposent plus rapidement. Ce sont le quartz et les feldspaths potassiques qui ont résisté à l'altération, et ce qui reste des feldspaths sodiques.

La teneur en feldspaths de la partie sableuse présente des fluctuations, ce qui confirme des conditions différentes de sédimentation dans cette partie. Les argiles subissent des fluctuations en sens contraire dans la plupart des cas ; par conséquent, ces feldspaths sont en voie d'altération. La calcite varie très peu. Elle s'est déposée d'une façon constante pendant cette période.

Les minéraux argileux se déposent progressivement par ordre de densité. La kaolinite, qui décante le plus rapidement, est faible au centre du bassin. L'illite, en pourcentage plus fort, dérive probablement en partie de la montmorillonite. On reconnait des traces de biotite altérée, de la limonite et, parfois, des galets de granite plus ou moins attaqués et des sables arkosiques.

B) Série détritique carbonatée :

A la suite de l'évolution climatique et des reliefs avoisinants, des effets géologiques et de l'érosion postérieure, la partie supérieure du remplissage du bassin est constituée de dépôts riches en carbonates ; d'argiles, avec un peu de quartz, et des feldspaths.

Au cours de cette sédimentation, il y a eu une interruption du dépôt de calcite et surtout un apport d'éléments détritiques grossiers. Par les analyses et les dosages, on n'a vu ni sulfures, ni gypse, ni dolomie.

En définitive, dans cette dépression, on distingue trois parties bien marquées : le socle granitique, une série sableuse, dont l'aspect brun est la conséquence de l'altération et de l'érosion intense du continent (éléments principaux : Si, Al, K), une série carbonatée au sommet du sondage, qui contient surtout de la calcite, des argiles, peu de feldspaths et de quartz.

L'altération du socle a été constante. Les sédiments arrivant dans le bassin ont les mêmes caractéristiques ; mais, pour la partie carbonatée, l'altération dans le bassin de ces sédiments a été stoppée.

CONCLUSIONS

Dans les sédiments du bassin de Saint-Agoulin, on a distingué par l'étude minéralogique : des sables, des argiles et des carbonates. La teneur et les rapports entre ces teneurs sont différentes suivant le niveau. Les unités distinguées sont les suivantes :

- dépôts sableux fins : constitués de quartz, feldspaths et peu d'argiles (très peu de kaolinite, la montmorillonite et l'illite étant dominantes dans la fraction argileuse) et très peu de calcite ;

- dépôts versicolores argilo-sableux inférieurs : ils contiennent les mêmes minéraux, avec disparition de la montmorillonite. On trouve des galets de granite dispersés dans ces dépôts ;

- dépôts versicolores argilo-sableux supérieurs : même comportement que les deux précédents, mais ne contenant pas de granite ;

- unité verdâtre argilo-sableuse : elle se différencie des autres par une nuance dans la couleur apparente, une légère diminution du quartz et une réapparition de la montmorillonite.

L'ensemble de ces unités est appelé "la partie sableuse", par opposition à la partie supérieure, riche en carbonates.

La "partie carbonatée" contient beaucoup de calcite, des argiles, très peu de quartz, et des feldspaths. Dans la fraction argileuse de cette partie, la kaolinite est toujours faible et la montmorillonite varie directement avec la calcite et inversement avec l'illite. Dans cette série, on rencontre une bande de calcite pure, en bas, et une anomalie de quartz, en haut.

GEOCHIMIE

Les résultats des analyses, au point de vue géochimique, donnent une répartition différente des éléments majeurs et mineurs dans la série sédimentaire. Par les études de corrélations, on a constaté que certains éléments sont liés aux minéraux, ce qui confirme quelques phénomènes géologiques (corrélations entre feldspath potassique et K, feldspath sodique et Na. Il y a des corrélations qui vérifient les hypothèses minéralogiques (corrélations inverses entre la montmorillonite et l'illite). On a trouvé quelques corrélations entre différents éléments obéissant à certaines lois (corrélations entre Fe^{3+} et Ti, Al et Ti). Grâce à ces corrélations, on est arrivé à définir le cycle sédimentaire de ce bassin.

CYCLE SEDIMENTAIRE.

Par la répartition minéralogique, lithologique et chimique des constituants de la dépression de Saint-Agoulin, on a trouvé de bonnes analogies entre les conditions de remplissage de ce bassin et celles des autres bassins du Massif Central (Le Puy, Aurillac, Salins, ...).

Le cycle est "positif" ; il débute par une sédimentation exclusivement détritique et se termine par des dépôts à caractères à la fois chimique, carbonaté et détritique.

BIBLIOGRAPHIE

AMES L.L., SAND L.B., (1958) - The American Mineralogist (641).

BALL D.F., (1965) - The Analyst, Vol. 90 (258).

BECKMANN G.G., (1963) - Norelco Reporter, Vol. 10, n° 3 (83).

BLACK R.H., (1963) - Norelco Reporter, Vol. 10, n° 1 (14).

BROUSSE R., MAUREL P., (1962) - Bull. Soc. fra. Minér. Crist. (128-130).

CHAYES F., Mac KENZIE W.S., (1957) - The American Mineralogist (534).

CHENEVOY M., (1958) - "Contribution à l'étude des schistes cristallins de la partie nord-ouest du Massif-Central".

CLAISSE F., (1950) - The American Mineralogist (412).

C.E.N., (1959) - "Applications des rayons X à l'étude des minéralisations radioactives" (Bruxelles).

FRONDEL C., (1955) - The American Mineralogist (876).

GABIS V., (1958) - Bull. Soc. fra. Minér. Crist. (183).

GABIS V., (1964) - Thèse de Doctorat d'Etat, Sciences Naturelles, (Paris).

GONI J., (1960) - Bull. Soc. fra. Minér. Crist. (254).

GROLIER J., (1965) - Thèse de Doctorat d'Etat, Sciences Naturelles, (Clermont-Ferrand).

HOOPER P.R., (1964) - Analytical Chemistry, Vol. 36, n° 7 (258).

IIYAMA J.T., (1966) - Bull. Soc. fra. Minér. Crist. (442).

JEFFRIES C.D., (1963) - Norelco Reporter, Vol. 10, n° 1 (16).

JUNG J., (1954) - Bull. Soc. fra. Minér. Crist. (123).

KIBLER B., (1964) - Revue de l'Institut Français du Pétrole (1093).

LODDING W., STURM E., (1957) - The American Mineralogist (78).

Mac KENZIE W.S., SMITH J.V., (1955) - The American Mineralogit (707).

Mac KENZIE W.S., SMITH J.V., (1955) - The American Mineralogist (733).

MAUREL P., RUPPLI C., (1961) - Bull. Soc. fra. Minér. Crist. (363).

MAUREL P., (1963) - Thèse de Doctorat d'Etat, Sciences Naturelles, (Paris).

MAUREL P., (1964) - Bulletin du Groupe Français des Argiles, Tome 15, n° 10, (65-76).

MERX H., VON EUW M. - Revue des matériaux de construction (Ciment et Bétons), n° 594 (130).

MUNCH R.H., PIERRON E.D., (1963) - Norelco Reporter, Vol. 10, n° 2 (75).

POUGET R. (1962) - Rapport C.E.A. n° 2176.

RAOUL F., (1965) - Rapport C.E.A. (inédit) (Figures 1, 2 et 3).

SABATIER G., (1962) - Génèse et synthèse des argiles, Colloque C.N.R.S., n° 105 (183).
SIEVER R., (1957) - The American Mineralogist (821).
TENNANT C.B., BERGER R.W., (1957) - The American Mineralogist (23).
TURNER G.H., (1963) - Norelco Reporter, Vol. 10, n° 1 (35).
VAN DIJKE BEATTY S., (1949) - The American Mineralogist (74).
WYART J., SABATIER G., (1959) - Bull. Soc. fra. Minér. Crist. (216).
WEAVER C., (1958) - The American Mineralogist (839).

Manuscrit reçu le 28.6.68

DEUXIEME THESE

Propositions données par la Faculté

"Dosage des silicates par spectrographie de rayons " X "

Vu et approuvé :
Paris, le 23 Juin 1967
Le Doyen de la Faculté des Sciences,
Marc. ZAMANSKY

Vu
et Permis d'imprimer :
Le Recteur de l'Académie
de Paris,
Jean ROCHE

IMPRIMERIE LOUIS-JEAN
Publications scientifiques et littéraires
TYPO - OFFSET
05 - GAP - Téléphone 14-23 14-24
Dépot légal : n° 365 - 1969